



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMEN
PEMANAS AIR TENAGA SURYA
DENGAN VARIASI PENAMBAHAN
MASSA MATERIAL PENYIMPAN PANAS
PADA TANGKI PENYIMPANAN**

BAGUS SETIAWAN
NRP. 2111100107

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY OF
SOLAR WATER HEATER WITH
ADDITIONAL VARIATION OF MASS HEAT
STORAGE MATERIAL IN THE STORAGE TANK**

**BAGUS SETIAWAN
NRP. 2111100107**

**Academic Supervisor
Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

**STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA
DENGAN VARIASI PENAMBAHAN MASSA MATERIAL
PENYIMPAN PANAS PADA TANGKI PENYIMPANAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**BAGUS SETIAWAN
NRP. 2111 100 107**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng (Pembimbing)
(NIP. 195310191979031002)
2. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME (Penguji I)
(NIP. 195312191981031001)
3. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT (Penguji II)
(NIP. 197301161997021001)
4. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT (Penguji III)
(NIP. 2100201405002)

**SURABAYA
Juli, 2015**

STUDI EKSPERIMEN

PEMANAS AIR TENAGA SURYA DENGAN VARIASI PENAMBAHAN MASSA MATERIAL PENYIMPAN PANAS PADA TANGKI PENYIMPANAN

Nama Mahasiswa : Bagus Setiawan

NRP : 2111100107

Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS

Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng

Abstrak

Energi radiasi matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang digunakan dalam upaya pengurangan penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu aplikasi yang banyak diterapkan adalah pemanas air tenaga surya. Kebutuhan terhadap air panas cukup banyak diminati, terutama pada sektor pariwisata. Di Indonesia sendiri potensi sumber energi radiasi matahari rata-rata sekitar $4,80 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Sistem pemanas air tenaga surya terdiri dari kolektor dan tangki penyimpanan. Alat yang digunakan untuk menangkap radiasi matahari adalah kolektor surya, kemudian panas tersebut dipindahkan ke air yang ada didalam kolektor surya. Air panas yang keluar dari kolektor surya tersebut kemudian disimpan dalam suatu tangki penyimpanan. Salah satu langkah yang dapat mengoptimalkan energi yang diterima dan tersimpan lebih lama adalah dengan penambahan material penyimpan panas pada tangki penyimpanan.

Sistem kolektor surya yang dirancang adalah sistem kolektor pelat datar dengan posisi kolektor horizontal dengan panjang pelat absorber 150 cm dan lebar sebesar 75 cm. Pelat kolektor tersebut disambungkan pada tangki penyimpanan berkapasitas 450 liter yang digunakan untuk menyimpan air panas dari keluaran kolektor. Volume air yang digunakan sebesar 150 liter. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan penambahan massa material penyimpan panas

berupa batu jenis limestone yang diletakkan didalam tangki penyimpanan. Bersarnya variasi dimulai dari 0 kg hingga 100 kg massa batu dengan kenaikan sebesar 25 kg. Pengambilan data dilakukan mulai jam 07.00 WIB hingga 02.00 WIB. Keran penghubung antara kolektor surya dengan tangki penyimpanan ditutup ketika matahari tenggelam. Pengujian dilakukan di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Dari percobaan didapat efisiensi terbesar kolektor adalah 18%, penyimpanan 84%, dan total 15%. Penambahan massa batuan dalam tangki penyimpanan yang paling efektif adalah sebesar 50 kg yang memiliki efisiensi tangki penyimpanan sebesar 82%. Temperatur air dalam tangki pada akhir pengujian dengan penambahan massa batu 50 kg relatif tinggi dibanding dengan yang lain yaitu sebesar $38,5^{\circ}\text{C}$. Penggunaan tangki penyimpanan paling efektif yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu dengan rasio antara massa batuan yang ditambahkan dengan massa air sebesar 1:3.

Kata Kunci: Kolektor surya, massa batu, penyimpan panas, tangki penyimpanan.

EXPERIMENTAL STUDY OF SOLAR WATER HEATER WITH ADDITIONAL VARIATION OF MASS HEAT STORAGE MATERIAL IN THE STORAGE TANK

Name : Bagus Setiawan
NRP : 2111 100 107
Department : Mechanical Engineering, FTI-ITS
Advisor Lecturer : Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng

Abstract

Solar radiation energy is one of renewable energy source that is used in efforts to reduce the use of fossil fuels. One of the applications that widely applied is solar water heater. The need for hot water is pretty much in demand, especially in the tourism sector. In Indonesia, the average potential of the solar radiation energy sources is around 4.80 kWh/m²/day. The solar water heater system consists of a collector and a storage tank. The tools that is used to capture the solar radiation is solar collector, then the heat is transferred to the water in the solar collector. Hot water that comes out of solar collector then stored in a storage tank. One of ways that can optimize the energy received and stored for longer period is by adding mass heat storage material in the storage tank.

Designed of solar collector is a horizontal flat plate collector system that has length equal to 150 cm and width equal to 75 cm. The collector plate is connected to the storage tank that has 450 liters capacity which is used to store the hot water from the collector output. The water volume that used is 150 liters. Variation that was made in this study is the addition of mass heat storage material in the form limestone, that is placed in the storage tank. The variation starts from 0 kg to 100 kg mass of stones with gain of 25 kg. Data were collected starting at 07:00 am until 2:00 am. The Valve between the solar collector to the

storage tank was closed when the sun sets. Research was carried out at the Department of Mechanical Engineering FTI-ITS.

From experimental study, the greatest efficiency's collector is 18%, storage efficiency is 84%, and total system efficiency is 15%. The most effective addition of mass heat storage material is 50 kg that has storage efficiency equal to 82%. Water temperature in the tank at the end of the test, with the addition of 50 kg mass of stones, is 38.5 °C and relatively high compared to the others. The most effective use of storage tank that can be produced in this research is with the ratio between mass of rock and mass of water at 1:3

Keyword: Heat storage, mass of stone, solar collector, storage tank.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadiran Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, karena atas izin, karunia, dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA DENGAN VARIASI PENAMBAHAN MASSA MATERIAL PENYIMPAN PANAS PADA TANGKI PENYIMPANAN

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu dan ayah tercinta, yaitu Sunarsih dan Herman Suleha, yang telah menjadi orang terbaik dalam hidup penulis dan selalu memberikan doa dan dukungan dalam segala kondisi.
2. Adik Halimatus Sya Diah, Kakak Andri Septianto, Nenek Reti dan Tarki, serta segenap keluarga besar yang telah memberikan doa dan dukungannya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyempatkan waktu dan tenaganya untuk senantiasa memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME; Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT; dan Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST, MT selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis.
5. Bapak Wahyu Wijanarko, ST, MSc dan Putu Suwarta, ST, MSc yang telah menjadi dosen wali dan memberikan arahan-

arahannya kepada penulis selama masa perkuliahan tahap Sarjana.

6. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak bantuan selama penulis berkuliah, baik akademis maupun non-akademis.
7. Wildan Farizky Arsy, Harnanto Budi Utomo, dan Azwar Sudirman, sahabat sekaligus partner tugas akhir Energi Surya yang telah berjuang bersama, bersabar, bergembira maupun duka dalam mengerjakan dan menyelesaikan setiap bagian dari Tugas Akhir ini.
8. Rici, Cerri, Rofia, Warida, Kombet, Tenyom, Joni, Yaumal, Aji, Ciscus, Dina yang telah berjuang bersama-sama dalam mengerjakan tugas akhir.
9. Seluruh Laskar Perpan, yang telah memberikan bantuan, dukungan dan kenangan.
10. Teman-teman satu angkatan M54 terima kasih atas kekeluargaan, ilmu dan pengalaman yang telah diberikan.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut.

Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Pemanas Air Tenaga Surya yang Pernah Dilakukan	5
2.2 Prinsip Dasar Pemanas Air Tenaga Surya	8
2.2.1 Tentang pemanas air tenaga surya	8
2.2.2 Cara kerja pemanas air tenaga surya	9
2.3 Radiasi Surya	11
2.3.1 Konstanta surya	11
2.3.2 Faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi surya di Bumi	12
2.3.3 Radiasi surya pada suatu permukaan horizontal di Bumi	16
2.4 Kolektor Surya	18
2.4.1 Kolektor surya pelat datar	19
2.4.2 Proses perpindahan panas pada kolektor	21
2.5 Tangki Penyimpanan Pemanas Air Tenaga Surya	29
2.5.1 Media penyimpan panas	30
2.5.2 Penyimpan panas air	32
2.6 Performansi	36
BAB III METODOLOGI	
3.1 Perencanaan Penelitian	39

3.1.1 Kebutuhan material	39
3.1.2 Skema Percobaan	40
3.2 Peralatan dan Bahan	42
3.3 Prosedur Pengujian	44
3.4 Diagram Alir Penelitian	47
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Alat Penelitian Pemanas Air Tenaga Surya	49
4.2 Data Hasil Penelitian	51
4.3 Perhitungan	51
4.3.1 Perhitungan bagian kolektor	52
4.3.2 Perhitungan bagian tangki penyimpanan	59
4.3.3 Perhitungan efisiensi	63
4.4 Analisa Data	64
4.4.1 Analisa grafik data hasil penelitian	65
4.4.2 Analisa grafik perbandingan antara ΣQ_u , ΣQ_s , dan ΣGT	71
4.4.3 Analisa Efisiensi	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Konsumsi bahan bakar pembangkit listrik menurut BPPT	2
Gambar 1.2	Proyeksi penyediaan energi menurut BPPT	2
Gambar 2.1	Grafik iradiasi matahari pada berbagai kemiringan kolektor dan suhu lingkungan	6
Gambar 2.2	Grafik temperatur fluida pada berbagai kemiringan kolektor	6
Gambar 2.3	Grafik perbandingan temperatur air pada percobaan dengan temperatur lingkungan	7
Gambar 2.4	Grafik perbandingan temperatur berbagai material penyimpan panas pada percobaan	8
Gambar 2.5	Posisi matahari terhadap permukaan bidang datar di bumi	13
Gambar 2.6	Sudut deklinasi terhadap bidang equator	14
Gambar 2.7	Penyerapan radiasi surya oleh kolektor pelat datar	21
Gambar 2.8	Tahanan Termal kolektor	22
Gambar 2.9	Sistem penyimpanan <i>hybrid</i> oleh Atomic International	31
Gambar 2.10	Tipikal sistem penggunaan tangki penyimpanan air	32
Gambar 2.11	Penyimpanan <i>unstratified</i> dari massa m beroperasi tergantung pada waktu temperatur T_s dan temperatur lingkungan T_a	33
Gambar 2.12	Tangki lima nodal dengan $T_{s2} > T_{c,o} > T_{s3}$	34
Gambar 2.13	Stratifikasi tiga nodal pada tangki penyimpanan	35
Gambar 3.1	Skema peralatan kolektor surya dengan tangki penyimpanan: (a) tampak samping, (b) tampak atas	44
Gambar 3.2	Pyranometer	44
Gambar 3.3	Anemometer digital	44
Gambar 3.4	Batu yang digunakan dalam penelitian	44
Gambar 3.5	Thermocouple digital	44

Gambar 3.6 Letak geografis Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS berdasarkan <i>software</i> Google Maps	45
Gambar 3.7 Contoh lembar data percobaan	46
Gambar 3.8 Diagram alir penelitian	47
Gambar 4.1 Rangkaian alat pengujian pemanas air tenaga surya	49
Gambar 4.2 Contoh data yang diambil untuk perhitungan	51
Gambar 4.3 Grafik GT, S, Tp, Ti, To, Ts fungsi waktu pada tanggal 21 Mei 2015 tanpa penambahan massa batuan	65
Gambar 4.4 Grafik GT, S, Tp, Ti, To, Ts fungsi waktu pada tanggal 22 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 25 kg	65
Gambar 4.5 Grafik GT, S, Tp, Ti, To, Ts fungsi waktu pada tanggal 23 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 50 kg	66
Gambar 4.6 Grafik GT, S, Tp, Ti, To, Ts fungsi waktu pada tanggal 24 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 75 kg	66
Gambar 4.7 Grafik GT, S, Tp, Ti, To, Ts fungsi waktu pada tanggal 25 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 100 kg	67
Gambar 4.8 Grafik perbandingan temperatur <i>storage</i> pada masing-masing variasi pengujian	67
Gambar 4.9 Grafik perbandingan jumlah energi berguna, energi tersimpan, dan intensitas matahari	71
Gambar 4.10 Grafik perbandingan efisiensi kolektor, <i>storage</i> , dan total pada tiap variasi pengujian	73

BAB I

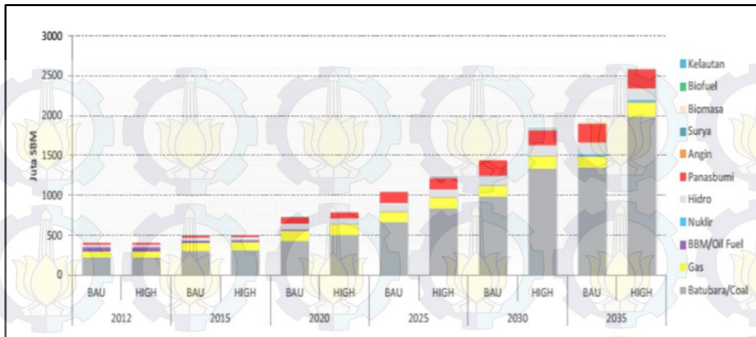
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

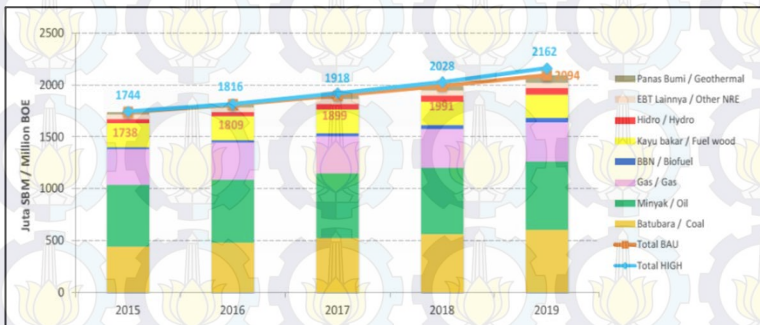
Jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2012 mencapai 245 juta jiwa meningkat dari 205 juta jiwa pada tahun 2000 dengan pertumbuhan rata-rata 1,31% per tahun. Permasalahan energi saat ini timbul disebabkan karena kebutuhan manusia semakin tahun semakin meningkat dan pemenuhannya dilakukan dengan penggunaan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui seperti terlihat pada gambar 1.1. Sedangkan dimasa yang akan datang sudah diproyeksikan oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) bahwa pemenuhan kebutuhan tersebut tetap bersumber dari SDA tidak terbarukan. Terlihat pada gambar 1.2 bahan bakar minyak (BBM) masih dominan digunakan.

Produksi minyak terus menurun sementara permintaan energi terus tumbuh yang menyebabkan peningkatan impor minyak mentah dan produk olahan. Walaupun potensi yang dimiliki Indonesia cukup besar tetapi pemanfaatan gas bumi dalam negeri masih terbatas. Hal ini disebabkan, belum tersedianya infrastruktur yang memadai untuk pemanfaatan gas bumi serta adanya ekspor gas dalam jumlah besar pada kontrak jangka panjang.

Secara umum pemanfaatan energi terbarukan masih relatif kecil. Hal ini disebabkan berbagai faktor yang menjadi masalah, antara lain adalah tingginya biaya investasi, birokrasi, insentif atau subsidi, dan harga jual produk akhir energi terbarukan yang lebih tinggi dibandingkan dengan energi fosil, kurangnya pengetahuan dalam mengadaptasi fasilitas energi bersih, serta potensi sumberdaya EBT pada umumnya kecil dan tersebar.



Gambar 1.1 Konsumsi bahan bakar pembangkit listrik menurut BPPT



Gambar 1.2 Proyeksi penyediaan energi menurut BPPT

Untuk mengatasi krisis energi masa depan, beberapa alternatif sumber energi mulai dikembangkan, salah satunya adalah energi matahari. Energi matahari biasa digunakan sebagai penerang dan sumber panas bagi kehidupan sehari-hari. Tak hanya itu, energi matahari dapat dikembangkan menjadi sumber energi lainnya.

Indonesia terdiri dari kesatuan pulau yang terbentang di sepanjang garis katulistiwa. Garis katulistiwa menggambarkan lintasan semu matahari pada permukaan bumi. Matahari yang jaraknya $1,5 \times 10^{11}$ m dari bumi, memancarkan energi radiasi dengan laju 1322 W/m^2 hingga 1395 W/m^2 . Menurut Ditjen EBTKE (2013), di Indonesia sendiri potensi sumber energi matahari rata-rata sekitar 4,80

kWh/m²/hari. Besarnya potensi energi surya ini sangat cocok untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan.

Meskipun Indonesia adalah termasuk negara dengan iklim tropis dengan temperatur udara yang relatif panas, tetapi pada kasus atau daerah tertentu ada kebutuhan air panas untuk mandi. Pada daerah yang temperatur hariannya relatif rendah seperti daerah pegunungan sudah sangat umum digunakan air panas. Pada sektor pariwisata, yaitu bangunan hotel, penggunaan air panas adalah hal yang umum bahkan ada yang wajib. Demikian juga rumah sakit dan beberapa industri. Pada sektor-sektor ini, untuk menghasilkan air panas, sumber energi yang umum digunakan adalah listrik dan bahan bakar minyak. Hal ini diyakini menjadi salah satu sektor yang meningkatkan konsumsi energi yang berasal dari fosil.

Berdasarkan fakta bahwa Indonesia memiliki potensi sumber energi matahari yang cukup besar dan adanya kebutuhan energi untuk menghasilkan air panas, maka energi surya cocok digunakan sebagai sumber energi untuk menghasilkan air panas. Teknologi yang digunakan untuk menghasilkan air panas dari energi surya biasanya dikenal *solar water heater* (SWH) atau pemanas air tenaga surya. Ada beberapa jenis pemanas air tenaga surya yang dapat digunakan, yaitu pemanasan langsung dan dengan menggunakan teknik penyimpan panas atau *thermal storage*. Penggunaan teknik penyimpan panas dipilih karena waktu tersedia energi surya umumnya tidak sama dengan waktu penggunaan air panas. Untuk menjembatani perbedaan waktu ini maka dibutuhkan media penyimpan panas.

Tema utama penelitian ini adalah pembuatan pemanas air tenaga surya beserta tangki penyimpanan panas. Proses rancang bangun sebuah pemanas air meliputi perancangan prototipe, pengujian, perbaikan rancangan, optimasi, sampai pengembangan. Pada penelitian ini, pembahasan hanya

difokuskan pada perancangan, pembuatan dan pengujian awal.

1.2 Perumusan Masalah

Penyimpan panas yang dimaksud pada penelitian tugas akhir ini adalah tambahan batu kerikil yang ditempatkan di dalam *water storage* pada *solar water heater*. Tambahan batu kerikil dimaksudkan agar kemampuan penyimpan energi panas pada *water storage* lebih lama. Permasalahan yang terdapat pada penelitian ini adalah:

1. Seberapa besar penambahan massa batu kerikil yang efektif pada pemanas air tenaga surya?
2. Bagaimana performansi dari *solar water heater* dengan variasi penambahan batu kerikil yang ditempatkan dalam *water storage*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang relevan pada studi kasus tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Fluida yang digunakan adalah air dan tidak mengalami perubahan fase.
- b. Kolektor surya yang digunakan memiliki pipa susunan paralel.
- c. Permukaan absorber dianggap rata.
- d. Faktor debu, kotoran dan bayangan diabaikan.
- e. Tidak membahas mengenai analisa ekonomi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tugas akhir ini mempunyai tujuan sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui besar penambahan massa batu kerikil yang efektif pada pemanas air tenaga surya.
2. Mengetahui performansi dari *solar water heater* dengan variasi penambahan batu kerikil yang ditempatkan dalam *water storage*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

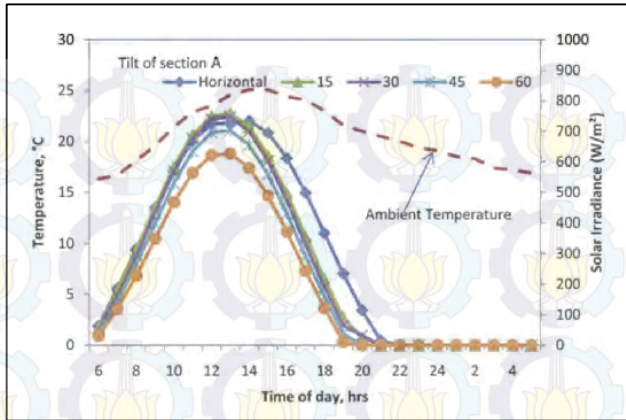
2.1 Penelitian Pemanas Air Tenaga Surya yang Pernah Dilakukan

Rakesh Kumar, Marc A. Rosen tahun 2010 dalam penelitiannya yang berjudul “*Integrated collector-storage solar water heater with extended storage unit*” melakukan percobaan tentang pemanas air tenaga surya tipe integrasi antara kolektor dengan tangki penyimpanan. Dalam percobaan tersebut, salah satu variasi yang dilakukan yaitu mengenai kemiringan dari kolektor.

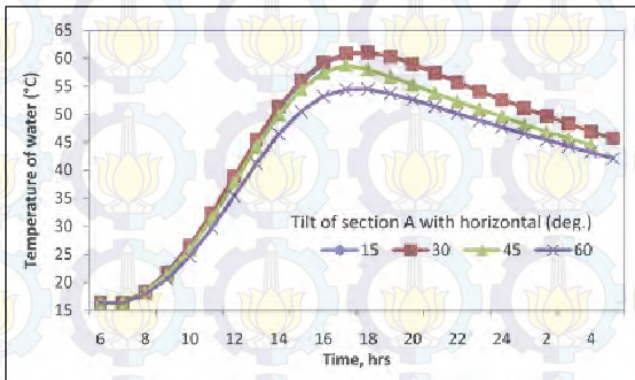
Percobaan dilakukan pada bulan Juli di Toronto. Dari percobaan tersebut didapat nilai dari iradiasi matahari yang mengenai berbagai sudut keiringan permukaan. Kemiringan yang diuji coba antara lain sebesar 60° , 45° , 30° , 15° , dan 0° atau horizontal. Terlihat dalam gambar 2.1 perbedaan antara masing-masing iradiasi yang diterima dengan kemiringan tertentu. Grafik tersebut dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh dari sudut kemiringan dari kolektor.

Dalam gambar 2.2 kolektor dimodifikasi bervariasi untuk memaksimalkan *thermal output* di Toronto. Untuk variasi ini, volume air dibuat sama pada setiap pengujian. Suhu air diukur pada kemiringan sudut 15° , 30° , 45° , dan 60° dengan nilai radiasi matahari pada pelat kolektor diilustrasikan pada gambar 2.1. Suhu air maksimum dicapai dalam pemanas air dengan sudut kemiringan 30° . Oleh karena itu, sudut kemiringan kolektor berdasarkan penelitian untuk menghasilkan panas maksimum dari desain yang diusulkan untuk kondisi iklim Toronto adalah 30° .

M. Taki Al-Kamil dan Khalil K. Marzouq (1986) melakukan Studi performansi pemanas air tenaga surya dengan tangki penyimpan tipe *packed bed*. Dalam penelitian yang berjudul “*Performance of A Solar Water Heater Incorporating A Bed of Solid Particulates*”, penulis menguji sebuah pemanas air



Gambar 2.1 Grafik iradiasi matahari pada berbagai kemiringan kolektor dan suhu lingkungan



Gambar 2.2 Grafik tempratur fluida pada berbagai kemiringan kolektor

tenaga surya dengan tangki penyimpanannya. Tangki tersebut tidak hanya berisi air, namun juga diisi dengan material penyimpan panas lainnya berupa padatan.

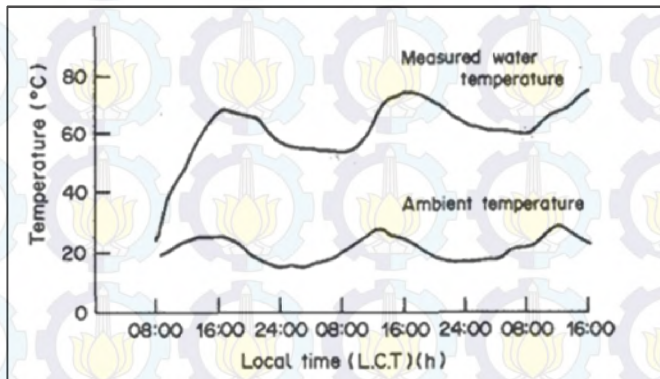
M. Taki Al-Kamil dan Khalil K. Marzouq (1986) melakukan Studi performansi pemanas air tenaga surya dengan tangki penyimpan tipe *packed bed*. Dalam penelitian yang berjudul "*Performance of A Solar Water Heater Incorporating A*

Bed of Solid Particulates”, penulis menguji sebuah pemanas air tenaga surya dengan tangki penyimpanannya. Tangki tersebut tidak hanya berisi air, namun juga diisi dengan material penyimpan panas lainnya berupa padatan.

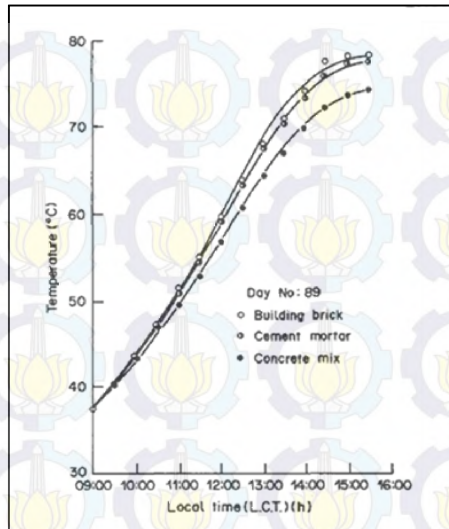
Beberapa variasi diambil dalam penelitian, diantaranya adalah variasi material penyimpan panas. Variasi tersebut dilakukan guna mengetahui karakteristik dari material penyimpan panas terhadap tangki penyimpanan. Gambar 2.3 menunjukkan mengenai temperatur air yang diukur pada percobaan dengan temperatur lingkungan sekitar. Perbedaan tersebut terjadi karena air menerima panas dari kolektor yang merupakan peralatan penangkap radiasi matahari.

Pada gambar 2.4 dapat diketahui tentang perbedaan dari masing-masing material penyimpan panas. Beberapa material digunakan dalam prediksi perhitungan, diantaranya adalah *building brick*, *cement mortar*, dan *concrete mix*. Hasilnya batu bata mempunyai nilai temperatur tertinggi yang dapat dijangkau dari ketiga material.

Penyelidikan secara eksperimen dan teoritis telah dilakukan, sejauh ini menunjukkan bahwa sistem pemanas dengan tangki penyimpan *packed bed* merupakan sistem dengan biaya rendah.



Gambar 2.3 Grafik perbandingan temperatur air dengan temperatur lingkungan



Gambar 2.4 Grafik perbandingan temperatur berbagai material penyimpan panas pada percobaan

2.2 Prinsip Dasar Pemanas Air Tenaga Surya

2.2.1 Tentang pemanas air tenaga surya

Energi matahari adalah sumber kehidupan di planet ini. Energi tersebut mencapai permukaan bumi dalam bentuk radiasi. Tanaman memanfaatkan hal tersebut melalui fotosintesis. Radiasi matahari menyediakan panas, yang dapat dipanen, dan dapat dikonversi menjadi listrik.

Ketika sinar matahari jatuh pada suatu permukaan, sebagian energi akan diserap dan permukaan menjadi lebih hangat. Cat permukaan yang berwarna gelap menyebabkan energi yang terserap lebih banyak. Apabila suatu permukaan tersebut merupakan sebuah pelat dan diletakkan dalam kotak, dilengkapi penutup diatas pelat dan kotak tersebut dilingkupi oleh insulasi maka akan membuat panas yang hilang ke lingkungan akan lebih sedikit. Panas ini bisa digunakan untuk menaikkan suhu air yang

kita gunakan untuk membersihkan, memasak dan proses lainnya. Air yang dipanaskan juga dapat digunakan untuk kolam renang dan pemanas ruangan. Energi matahari yang diterima bervariasi, karena perubahan cuaca tiap harinya. Namun, solar energi dapat disimpan dan digunakan ketika matahari tidak bersinar.

Kolektor surya dapat terbuat dari kolektor pelat datar sederhana tanpa kaca, untuk kolektor yang berbentuk kotak atau tabung biasanya ditutupi dengan kaca, hingga pengaturan kompleks dengan cermin. Kolektor surya biasanya ditemukan pada atap bangunan tapi bisa juga dipasang di dinding vertikal atau dipasang di atas tanah. Alat ini biasanya dipasang tetap menghadap ke satu arah tetapi juga dapat dipasang fleksibel di atas peralatan pelacak yang dapat berputar untuk mengikuti pergerakan matahari.

Di dalam kolektor surya, pelat absorber berwarna gelap menjadi panas dan ditransfer panasnya ke fluida seperti udara, air atau media lain melalui saluran pipa dan panasnya kemudian dipindahkan ke penyimpanan panas, biasanya terletak secara internal di dalam bangunan, tetapi juga dapat dipasang bergabung dengan kolektor.

2.2.2 Cara kerja pemanas air tenaga surya

Cara kerja pemanas air tenaga surya pada dasarnya adalah bagaimana mendapatkan air panas dengan memanfaatkan energi dari radiasi matahari yang terpancar ke bumi. Matahari merupakan sumber energi yang telah disediakan oleh alam semesta, secara kontinu manusia terus mempelajari untuk mengambil manfaat dari sinar matahari ini, salah satunya pengembangan teknologi pemanas air matahari yang menggunakan tenaga surya sebagai sumber intinya. Berdasarkan pada fenomena alam bahwa jika air ditampung pada suatu tempat atau wadah lalu dibiarkan terkena sinar matahari (dijemur) maka akan terjadi proses *heating* (pemanasan) dari suhu awal air yang semula dingin berubah menjadi lebih panas, fenomena seperti

inilah yang menjadi acuan dasar teknologi dalam membuat pemanas air.

Para ahli kemudian menambahkan alat kolektor dari pelat datar terbuat dari pelat logam berwarna hitam yang dipasang pada sebuah pipa logam berfungsi sebagai heater yang akan menyerap radiasi dari sinar matahari. Kolektor yang sudah dilengkapi penutup kaca dipasang pada sebuah tangki tempat menampung air panas sehingga dalam cuaca mendung ataupun malam hari maka alat ini yang akan bekerja untuk memanaskan air. Biasanya pemanas air terdiri dari dua buah komponen utama yaitu lempengan atau pelat pemanas dan tangki penyimpanan. Panas matahari diterima oleh lempengan pemanas, disalurkan untuk memanaskan air di dalam tangki penampung kemudian air dialirkan melalui pipa menuju ke keran-keran untuk digunakan.

Dapat dikatakan lempengan pengumpul panas (*solar collector*) diletakkan pada sisi yang paling mudah menangkap radiasi matahari se-efektif mungkin, memanaskan air yang kemudian mengalir ke dalam sistem melalui pompa (untuk pemanas aktif) atau memanfaatkan gaya gravitasi (untuk pemanas pasif). Kolektor panas matahari ini bisa berbentuk logam datar yang diikat pada pipa atau beberapa tabung logam tertutup vakum berbentuk silinder kaca.

Menurut cara kerja pemanas air tenaga surya terdapat dua sistem yaitu aktif dan pasif. Untuk yang menggunakan sistem aktif, dilengkapi oleh pompa atau kipas angin. Cara kerjanya ada dua macam yaitu secara langsung dan tidak langsung. Secara langsung jika air dipompa ke kolektor panas untuk dipanaskan lalu menuju langsung ke tangki penampung dan langsung dapat digunakan. Sedangkan untuk tidak langsung, setelah air dipanaskan di kolektor, air akan dilewatkan tangki penyimpanan dan kemudian kembali ke kolektor sampai merata kemudian baru disimpan di dalam tangki.

Sistem pasif lebih mudah dalam pemasangan dengan cara kerja yang lebih sederhana. Tangki air berfungsi ganda sebagai kolektor panas dan penampung air. Pergerakan air dikendalikan

oleh gaya gravitasi. Air dialirkan dari sumber air ke kolektor kemudian disirkulasikan sehingga panas merata lalu dialirkan ke tangki penyimpanan dengan reaksi konveksi. Konveksi menyebabkan terjadinya pertukaran antara air dingin di dalam tangki dengan air yang sudah dipanaskan dari kolektor panas.

Di Indonesia yang beriklim tropis sangat cocok menggunakan sistem pasif, terbukti efektif, lebih murah dan lebih mudah dalam perawatan dan pemeliharaan. Untuk pemanas air dengan sistem aktif akan lebih kompleks dalam pemeliharaan karena banyaknya komponen yang harus diperhatikan.

Pada pemanas yang menggunakan sistem pasif, dimulai dari air yang berada pada kolektor mengalami pemanasan dan akan bergerak ke sisi atas, masuk ke dalam tangki penyimpanan. Pada saat bersamaan, air di dalam tangki yang bersuhu rendah terdorong turun masuk ke kolektor. Pergerakan perputaran air ini bergerak berkesinambungan sehingga terjadi sirkulasi air yang mengakumulasi peningkatan suhu air didalam tangki.

2.3 Radiasi Surya

2.3.1 Konstanta surya

Surya (matahari) benda angkasa yang berbentuk bola yang terdiri dari beberapa lapisan gas dengan diameter sekitar $13,9 \times 10^5$ km. Diperkirakan bahwa 80% dari matahari adalah terdiri dari hidrogen dan 19% helium. Lapisan terluar dari matahari tempat energi dipancarkan ke sistem tata surya adalah ekuivalen dengan suatu benda hitam sempurna pada temperatur 5760 K. Sedangkan pusatnya mempunyai temperatur sekitar 20×10^6 K. Laju emisi energi matahari adalah $3,8 \times 10^{23}$ kW. Dari total energi ini hanya sekitar $1,7 \times 10^4$ kW diterima oleh bumi. Dari jumlah 30% dipantulkan ke angkasa, 47% dikonversikan menjadi kalor dengan temperatur rendah, 23% untuk proses evaporasi biosphere, kurang dari 0,5% berupa energi angin, energi gelombang, dan proses fotosintesis tumbuh-tumbuhan.

Konstanta matahari (G_{sc}) merupakan energi matahari per unit waktu yang diterima suatu unit luasan permukaan yang tegak

lurus terhadap arah datangnya radiasi, pada jarak rata-rata bumi dengan matahari diluar atmosfer. Besarnya matahari menurut Frochlich (1977) adalah 1353 W/m^2 . Sedangkan menurut Thekaera dan Drumond adalah $1353 \pm 1,5\% \text{ W/m}^2$. Besarnya radiasi ekstraterresial dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + \frac{0,033 \cos(360.n)}{365} \right) \quad (2.1)$$

dimana: G_{on} = intensitas radiasi matahari diluar atmosfer bumi (W/m^2)

G_{sc} = konstanta matahari $1353 \text{ (W/m}^2\text{)}$

n = hari ke- n (nomor urutan hari) dalam satu tahun, dimana $n=1$ pada 1 Januari.

2.3.2 Faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi surya di Bumi

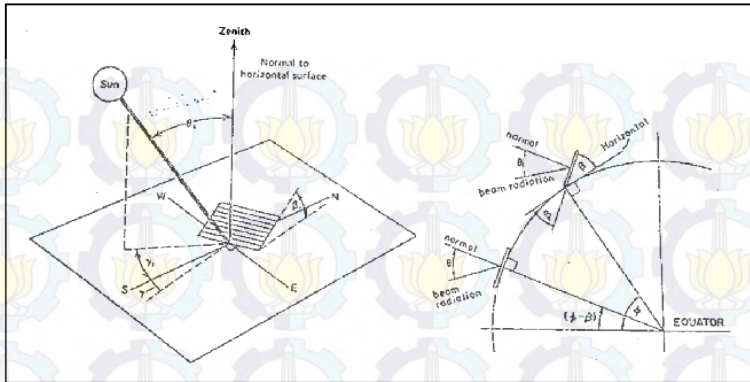
Faktor-faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi matahari pada permukaan di Bumi adalah:

- Posisi matahari

Bumi mengelilingi matahari selama satu tahun pada suatu lintasan yang berbentuk elips. Bidang ini membentuk sudut $23,5^\circ$ terhadap bidang equator. Akibat adanya sudut tersebut, maka matahari bergeser dan berada di belahan bumi bagian utara selama setengah tahun (6 bulan) dan di belahan bumi bagian selatan setengah tahun.

- Lokasi permukaan dan kemiringan permukaan

Lokasi dan kemiringan permukaan menentukan besarnya sudut datang radiasi pada permukaan tersebut. Hubungan geometrik antara sebuah permukaan dengan radiasi surya yang datang dapat dinyatakan dalam beberapa sudut seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 sebagai berikut.



Gambar 2.5 Posisi matahari terhadap permukaan bidang datar di Bumi

Keterangan:

ϕ = sudut lintang, sudut lokasi suatu tempat di permukaan bumi terhadap equator, dimana arah utara-selatan, $-90 \leq \phi \leq 90$ dengan utara bernilai positif.

β = sudut kemiringan, yaitu sudut antara bidang permukaan yang dimaksud terhadap bidang horizontal. $0 \leq \beta \leq 180^\circ$.

ω = sudut jam (*hour angle*), sudut antara bidang yang dimaksud dengan horizontal, berharga nol pada saat jam 12.00 waktu matahari, setiap jam setara 15° , kearah pagi bernilai negatif dan kearah sore bernilai positif.

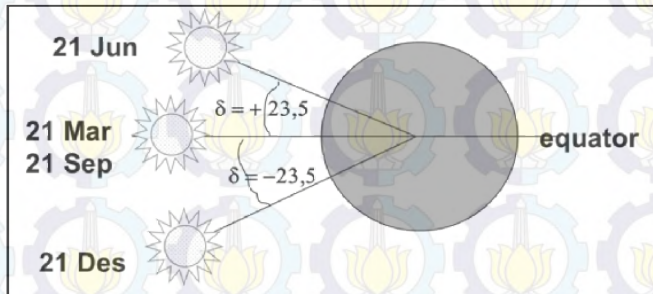
γ = sudut azimuth permukaan, sudut antara proyeksi permukaan pada bidang horizontal dengan meridian, titik nol di selatan, bernilai negatif kearah timur, bernilai positif kearah barat.

γ_s = sudut azimuth surya, adalah pergeseran angular proyeksi radiasi langsung pada bidang datar terhadap arah selatan.

δ = deklinasi, posisi angular matahari dibidang equator pada saat jam 12.00 waktu matahari. Sudut deklinasi dapat ditentukan dengan rumus:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2.2)$$

menurut Cooper 1969, dimana n adalah nomor urutan hari dalam satu tahun dimulai 1 Januari.



Gambar 2.6 Sudut deklinasi terhadap bidang equator

θ = sudut datang (*angle of incident*), sudut yang dibentuk antara radiasi langsung pada suatu permukaan dengan garis normal. Sudut datang merupakan fungsi dari tanggal, lokasi, kemiringan, permukaan menghadap, dan jam, yaitu dengan rumus:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.3)$$

θ_z = sudut zenith, sudut antara radiasi langsung dengan garis normal bidang horizontal. Dimana nilai $\beta=0$ ($\cos \beta=1$ dan $\sin \beta=0$) sehingga persamaan 2.3 menjadi:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (2.4)$$

- Waktu matahari

Perhitungan intensitas matahari pada saat tertentu umumnya didasarkan pada waktu matahari, yaitu waktu tertentu dalam hubungannya dengan matahari yang didasarkan pada garis bujur lokasi tersebut. Waktu matahari dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$t_s = \text{waktu lokal} + E + 4(L_{st} - L_{loc}) \quad (2.5)$$

dimana: L_{st} = garis bujur lokasi
 L_{loc} = garis bujur waktu standar
 E = $9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B$
 B = $360 (n-81)/364$

Sudut jam matahari terbit atau terbenam dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 dengan acuan θ_z berada ditengah tengah antara matahari terbenam dan terbit yaitu $\theta_z = 90^\circ$, Cosinus sudut jam terbenam matahari (ω_{set}):

$$\begin{aligned} \cos \omega_{set} &= \frac{-\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} \\ \cos \omega_{set} &= -\tan \phi \tan \delta \end{aligned} \quad (2.6)$$

Untuk sudut matahari terbit (ω_{rise}):

$$\cos \omega_{rise} = -\cos \omega_{set} \quad (2.7)$$

Lamanya matahari bersinar (N) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$N = \frac{2}{15} \omega_{set} \quad (2.8)$$

- Keadaan cuaca

Jumlah radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi dipengaruhi oleh faktor transmisi kandungan atmosfer. Di atmosfer radiasi surya diserap oleh unsur-unsur ozon, uap air, dan karbondioksida.

Disamping diserap, radiasi surya juga dihamburkan partikel-partikel seperti udara, uap air, dan debu.

Pada kenyataannya radiasi surya sering dihalangi oleh bermacam-macam tipe awan. Tipe awan yang berbeda mempunyai koefisien transmisi yang berbeda juga. Jadi untuk meramalkan radiasi matahari di bumi perlu diketahui pula tipe awan dan ketebalannya.

2.3.3 Radiasi surya pada suatu permukaan horizontal di Bumi

Efek dari atmosfer dalam pembiasan atau penyebaran dan menyerap radiasi adalah bervariasi tergantung pada waktu, kondisi atmosfer, dan perubahan massa udara. Hal ini akan lebih mudah dipahami dengan mendefinisikan sebagai standar “*clear sky*”, sehingga perhitungan dari radiasi perjam dan perharinya akan diterima oleh atas permukaan pada kondisi standar.

Radiasi matahari yang sampai pada suatu permukaan horizontal di bumi terdiri dari komponen-komponen: radiasi langsung atau beam (I_b), radiasi sebaran atau diffuse (I_d). Salah satu metode dalam mengestimasi radiasi langsung yang ditransmisikan melewati *clear atmospheres* yang menggunakan pendekatan sudut zenit dan ketinggian matahari untuk standar atmosfer dan empat iklim telah dikeluarkan oleh Hottel (1997). Transmittansi atmosfer untuk radiasi langsung (τ_b):

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos \theta_z} \quad (2.9)$$

dimana konstanta a_0 , a_1 , dan k didapat dari a_0^* , a_1^* , dan k^* , dengan:

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821 (6 - A^2) \quad (2.10)$$

$$a_1^* = 0,5055 + 0,00595 (6,5 - A^2) \quad (2.11)$$

$$k^* = 0,2711 + 0,01858 (2,5 - A^2) \quad (2.12)$$

dimana A adalah *altitude* dari pengamatan dalam kilometer. Faktor koreksi berpengaruh terhadap a_0^* , a_1^* , dan k^* dimana $r_0 = a_0/a_0^*$, $r_1 = a_1/a_1^*$, dan $r_k = k/k^*$ didapat dari tabel berikut:

Tabel 2.1 Faktor Koreksi pada Iklim yang Berbeda

Climate Type	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Midlatitude summer	0.97	0.99	1.02
Subarctic summer	0.99	0.99	1.01
Midlatitude winter	1.03	1.01	1.00

^a From Hottel (1976).

Sehingga untuk periode dalam satu jam, radiasi langsung pada horizontal dalam kondisi *clear sky* adalah:

$$I_{cb} = I_0 \tau_b \cos \theta_z \quad (2.13)$$

dengan I_0 dapat dihitung dari persamaan berikut ini:

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right] \times \left[\cos \phi \cdot \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \cdot \sin \delta \right] \quad (2.14)$$

dimana : G_{sc} = konstanta matahari, besarnya 1353 W/m^2
 ω_1 = sudut jam (*hour angle*) matahari pada awal pengamatan
 ω_2 = sudut jam (*hour angle*) matahari pada akhir pengamatan

Perlu juga mengestimasi radiasi sebaran dalam kondisi *clear sky* yang berfungsi untuk menghitung radiasi total. Liu dan Jordan (1960) mengembangkan persamaan empiris antara transmisivitas untuk radiasi langsung dengan radiasi sebaran untuk kondisi ini, yaitu:

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939\tau_b \quad (2.15)$$

Pada kondisi nyata atau tidak pada kondisi *clear sky*, besarnya radiasi *diffuse* tergantung pada kondisi kecerahan langit yang disebut dengan indeks kecerahan (kT) yang dapat dihitung dari persamaan:

$$kT = \frac{I}{I_0} \quad (2.16)$$

dimana : I = radiasi matahari total pada permukaan horizontal di bumi tiap jam (watt/jam).

I_0 = radiasi matahari total pada permukaan datar di luar atmosfer bumi tiap jam (watt/jam).

Harga I dapat dihitung dengan alat ukur yaitu *solarimeter* atau *pyranometer*. Sedangkan harga I_0 didapat dari persamaan 2.14. Bila harga (kT) diketahui maka harga radiasi *diffuse* di permukaan bumi dapat dihitung dengan persamaan:

$$I_d = I (1 - 0,249kT) \quad \text{untuk } kT < 0,35 \quad (2.17)$$

$$I_d = I (1,557 - 1,84kT) \quad \text{untuk } 0,35 < kT < 0,75 \quad (2.18)$$

$$I_d = I (0,177) \quad \text{untuk } kT > 0,75 \quad (2.19)$$

Semua persamaan radiasi matahari diatas berlaku untuk kondisi permukaan horizontal. Sehingga radiasi total pada permukaan bidang datar horizontal dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = I_b + I_d \quad (2.20)$$

2.4 Kolektor Surya

Kolektor surya merupakan suatu peralatan untuk menampung radiasi energi surya sekaligus mengubahnya menjadi energi panas, untuk kemudian digunakan secara langsung atau disimpan terlebih dahulu pada suatu unit penyimpanan.

2.4.1 Kolektor surya pelat datar

Kolektor surya plat datar merupakan bentuk dari kolektor yang paling sederhana. Kolektor surya pelat datar umumnya terdiri dari rangka sebagai kedudukan komponen-komponen kolektor, penutup transparan berfungsi untuk mengurangi kerugian panas akibat konveksi dan radiasi dari pelat penyerap ke lingkungan luar, pelat penyerap sebagai alat untuk menyerap radiasi matahari, pipa atau saluran fluida untuk tempat fluida kerja. Kolektor surya pelat datar menggunakan prinsip konstruksi dimana dibedakan atas letak fluida kerja yang dipanaskan. Ada fluida kerja yang mengalir diatas pelat kolektor dan ada juga yang mengalir di bawah pelat kolektor. Disamping hal tersebut kolektor surya juga dilengkapi dengan insulasi pada bagian tertentu yang digunakan untuk mengurangi rugi panas ke lingkungan.

Kolektor surya pelat datar dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan panas pada tingkat rendah sampai menengah. Keuntungan kolektor pelat datar bila dibandingkan dengan kolektor jenis lain adalah konstruksinya, tidak memerlukan pengarah atau reflektor, serta biaya pembuatan dan pemeliharaan relatif rendah.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja dari kolektor tersebut, diantaranya adalah:

1. Penutup kolektor

Penutup kolektor berada pada bagian atas dari pelat kolektor. Bagian ini merupakan bagian dari kolektor yang pertamakali menerima radiasi sebelum ke pelat kolektor. Bahan yang digunakan untuk penutup biasanya tidak berwarna atau transparan. Pemilihan tipe penutup kolektor seperti ini diharapkan nantinya akan memiliki sifat transmisivitas tinggi dengan absorptivitas dan reflektivitas serendah mungkin. Seperti halnya cahaya yang menimpa sebuah benda akan mengalami tiga kemungkinan, yaitu dipantulkan sebesar ρ (reflektivitas), diserap sebesar α (absorptivitas), dan diteruskan sebesar τ (transmisivitas).

Hubungan antara ketiga sifat tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.21)$$

2. Pelat Penyerap

Unjuk kerja pelat penyerap sangat berpengaruh terhadap efisiensi kolektor, dimana berkas radiasi yang menimpanya dapat ditampung dan diubah menjadi energi bentuk panas yang berguna. Pelat penyerap yang ideal memiliki absorptivitas tinggi guna menyerap radiasi surya dengan sebaik mungkin.

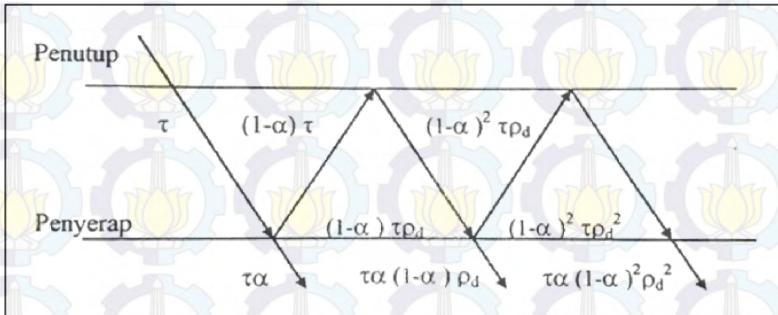
Berkas radiasi surya yang menimpa kolektor, pertama akan menembus penutup baru kemudian menimpa pelat penyerap. Radiasi ini sebagian diserap oleh pelat penyerap dan sebagian lagi dipantulkan kembali. Pantulan dari pelat penyerap ini akan kembali dipantulkan oleh penutup kolektor, sehingga akan terjadi proses pemantulan yang berulang. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.7 dimana τ adalah transmisivitas penutup dan α adalah absorptivitas angular pelat penyerap.

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad (2.22)$$

Apabila sejumlah energi radiasi menimpa kolektor, maka energi sebesar $(\tau\alpha)$ akan diserap oleh pelat penyerap dan sebesar $(1-\alpha)\tau$ dipantulkan kembali ke penutup. Pantulan dari pelat penyerap dianggap sebagai hambur, sehingga $(1-\alpha)\tau$ yang mengenai penutup merupakan radiasi hambur dan $(1-\alpha)\tau\rho_d$ dipantulkan kembali ke pelat penyerap. Proses pemantulan tersebut akan terus berulang. Maksimum energi yang dapat diserap oleh kolektor adalah:

dimana $(\tau\alpha)$ adalah *transmitansi absorbtansi product*. Dari hasil penelitian bahwa harga $(\tau\alpha)$ sangat mendekati $1,01 \cdot \tau \cdot \alpha$, sehingga dalam pemakaian seringkali harga ini dipakai, dengan demikian persamaannya menjadi:

$$(\tau\alpha)_{ave} = 1,01 \times \tau \cdot \alpha \quad (2.23)$$



Gambar 2.7 Penyerapan radiasi surya oleh kolektor pelat datar

Perkalian transmisivitas-absorbtivitas rata-rata $(\tau\alpha)_{ave}$, didefinisikan sebagai perbandingan radiasi surya yang menimpa, G_T . Sehingga jumlah radiasi yang dapat diserap oleh permukaan pelat (S) adalah:

$$S = (\tau\alpha) G_T = 1,01 \cdot \tau \cdot \alpha \cdot G_T \quad (2.24)$$

2.4.2 Proses perpindahan panas pada kolektor

Energi berguna yang dihasilkan dapat dinyatakan sebagai radiasi surya yang diterima pelat penyerap dikurangi dengan kerugian panas yang terjadi. Sejumlah energi yang diserap alat penyerap panas (S) akan memanaskan plat tersebut sepanjang arah aliran fluida hingga bertemperatur sama dengan temperatur pelat penyerap. Kehilangan energi panas dari kolektor ke lingkungan dinyatakan sebagai koefisien perpindahan panas total (U_L) dikalikan perbedaan antara temperatur rata-rata pelat ($T_{p,m}$) dengan temperatur lingkungan (T_a). Dalam keadaan tunak, persamaan dasar kesetimbangan energi keluaran yang berguna

dari kolektor merupakan perbedaan nilai dari radiasi yang diserap dan kerugian panas yang dinotasikan sebagai berikut:

$$Q_u = A_c [S - U_L(T_{p,m} - T_a)] \quad (2.25)$$

dimana: Q_u = energi yang berguna atau *useful energy* (W)

A_c = luasan pelat kolektor (m^2)

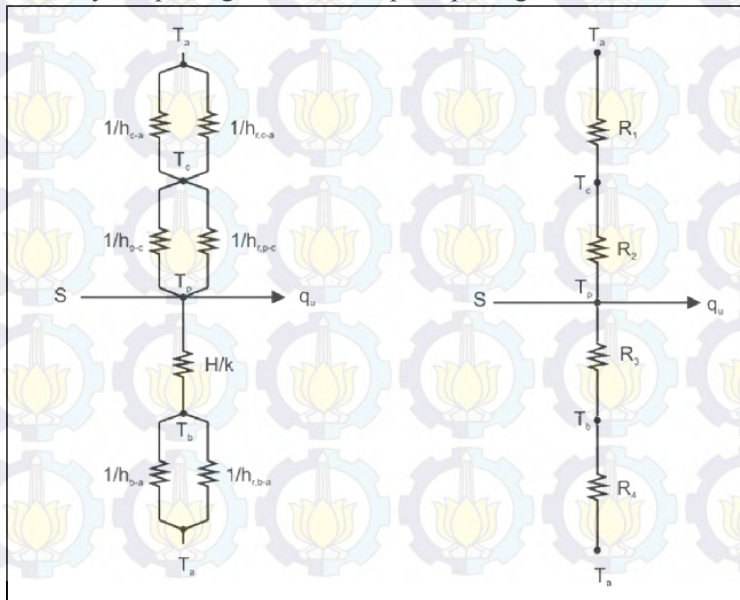
S = energi yang diserap alat penyerap atau pelat kolektor (W/m^2)

U_L = koefisien perpindahan panas total ($W/m^2 C$)

$T_{p,m}$ = temperatur rata-rata pelat (C)

T_a = temperatur lingkungan (C)

Kehilangan panas dari kolektor ke lingkungan dapat melalui cara konduksi, konveksi dan radiasi, untuk menyelesaikan masalah perpindahan panasnya, analisa alat pengering gabah ini menggunakan pendekatan konsep tahanan termal. Secara umum sebuah kolektor pelat datar dengan satu lapis penutup tahanan thermalnya dapat digambarkan seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Tahanan termal kolektor

Dimana notasi a menyatakan lingkungan, b adalah bagian bawah kolektor, c adalah bagian penutup kolektor, p adalah pelat.

Kerugian energi tiap satuan luas melalui sisi atas kolektor yang sama dengan perpindahan panas dari pelat penyerap ke penutup, yaitu:

$$q_{loss,atas} = h_{p-c}(T_p - T_c) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (2.26)$$

dimana: h_{p-c} = koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat dan penutup (W/m^2K)

T_p = Temperatur pelat penyerap (K)

T_c = Temperatur penutup transparan (K)

σ = konstanta Stefan-Boltzman = $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

ε_p = emisivitas pelat penyerap

ε_c = emisivitas penutup kolektor

Untuk menyederhanakan persamaan kerugian energi tersebut, persamaan radiasi dapat dilinierkan, maka dapat digunakan perpindahan panas radiasi, dan persamaan 2.26 menjadi:

$$q_{loss,atas} = (h_{p-c} + h_{r,p-c})(T_p - T_c) \quad (2.27)$$

dimana:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p - T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (2.28)$$

Sehingga tahanan termal total dari pelat penyerap ke penutup (R_2) adalah:

$$R_2 = \frac{1}{h_{p-c} + h_{r,p-c}} \quad (2.29)$$

Bila konveksi yang terjadi pada kolektor pelat datar adalah konveksi bebas, biasanya analisa perpindahan panasnya dikaitkan dengan parameter-parameter tak berdimensi seperti bilangan Nusselt (Nu), Rayleigh (Ra) dan Grashof yang merupakan perbandingan bilangan Rayleigh dan bilangan Prandtl (Pr):

$$Nu = \frac{h.L}{k} \quad (2.30)$$

$$Ra = \frac{g.\beta'.\Delta T.L^3}{\alpha.v} \quad (2.31)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.32)$$

dimana:

- h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²K)
- L = jarak antara pelat dan penutup (m)
- k = konduktivitas panas fluida (W/mK)
- g = konstanta gravitasi bumi (m/s²)
- ΔT = perbedaan temperatur antara pelat dan penutup (K)
- ν = viskositas kinematis fluida (m²/s)
- α = faktor penyebaran panas (m²/s)
- β' = koefisien ekspansi volumetrik (untuk gas ideal = 1/T)

penyelidikan lebih lanjut yang dilakukan Holland dkk (1976) memberikan hubungan antara bilangan Nusselt dan bilangan Rayleigh sebagai berikut:

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra.\cos\beta} \right]^+ \left[1 - \frac{1708(\sin 1,86.\beta)^{1,6}}{Ra.\cos\beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra.\cos\beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (2.33)$$

Pangkat positif pada persamaan diatas berarti bahwa hanya harga positif yang diperhitungkan, apabila bernilai negatif maka dianggap sama dengan nol.

Koefisien konveksi perpindahan panas dari penutup ke lingkungan didasarkan pada angin yang berhembus diatas

penutup, seperti pada persamaan yang didasari oleh Watmuff dkk, yaitu:

$$h_w = 2,8 + 3,0V_w \quad (2.34)$$

dimana:

h_w = koefisien perpindahan panas konveksi karena angin ($W/m^2 C$)

V_w = merupakan kecepatan angin yang berhembus (m/s)

Tahanan radiasi diatas penutup dihitung dari pertukaran radiasi yang terjadi dengan langit pada temperatur T_s , yaitu:

$$h_{r,c-a} = \frac{\varepsilon_c \cdot \sigma (T_c + T_s)(T_c^2 - T_s^2)(T_c - T_s)}{(T_c - T_a)} \quad (2.35)$$

Untuk menentukan temperatur langit (T_s), Swinbank memberikan pendekatan yang didasarkan pada temperatur udara sekitar (T_a), yaitu dengan hubungan persamaan:

$$T_s = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (2.36)$$

Sehingga tahanan termal dari penutup ke lingkungan (R_1) adalah:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \quad (2.37)$$

Jadi, koefisien kehilangan energi sisi atas (U_t) adalah:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (2.38)$$

Kehilangan energi yang melalui dasar kolektor dinyatakan dengan R_3 dan R_4 , dimana R_3 menyatakan tahanan terhadap aliran panas yang melalui isolator, dan R_4 merupakan tahanan termal terhadap konveksi dan radiasi ke lingkungan bawah kolektor. Harga R_4 dapat dianggap nol, sehingga tahanan aliran panas hanya yang

melalui isolator. Dengan demikian koefisien kehilangan energi sisi bawah (U_b) adalah:

$$U_b = \frac{1}{R_3} = \frac{k}{H} \quad (2.39)$$

Dimana k adalah konduktivitas termal dari isolator dan H adalah ketebalan dari isolator.

Pada umumnya evaluasi dari kehilangan panas dari samping (*edge loses*) sangat sulit. Dalam sistem yang mempunyai desain baik, *edge loses* seharusnya mempunyai nilai yang relatif kecil dan tidak perlu diperhitungkan dengan tingkat akurasi yang besar. Tabor (1958) merekomendasikan ketebalan insulasi sisi samping disamakan dengan ketebalan insulasi bagian bawah kolektor. Kemudian kehilangan panas arah samping dapat diestimasi dengan mengansumsikan aliran panas hanya satu dimensi (*one dimensional sideways heat flow*) sikitar keliling dari sistem kolektor. Kehilangan panas melewati sisi samping dipengaruhi oleh luasan kolektor. Jika koefisien kehilangan panas luasan produk adalah $(UA)_{edge}$, maka koefisien kehilangan panas samping adalah:

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} = \frac{(k/H)2(p+l)(t)}{A_c} \quad (2.40)$$

dimana:

- k = konduktivitas dari bahan insulasi (W/mC)
- H = tebal insulasi sisi samping (m)
- $2(p+l)$ = keliling dari pelat kolektor (m)
- t = tebal pelat (m)
- A_c = luasan kolektor (m^2)

Koefisien kehilangan panas total dari kolektor (U_L) adalah penjumlahan dari koefisien kehilangan panas atas, bawah dan samping.

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.41)$$

Pada persamaan 2.25, masalah yang terdapat pada hal tersebut adalah menghitung atau mengukur besarnya temperatur rata-rata pelat (T_{pm}) karena tergantung desain dari kolektor, kedatangan radiasi surya (*incident solar radiation*), dan kondisi fluida memasuki kolektor. Ada beberapa pendekatan pada persamaan dasar yang dapat digunakan, nantinya energi berguna yang diterima (q_u) dapat dinyatakan dengan sebuah parameter yang disebut *collector heat removal factor*, yang dapat analisa dari prinsip dasar atau pengukuran eksperimen. *Collector heat removal factor* (F_R) merupakan sebuah bilangan yang menyatakan hubungan antara energi berguna aktual dari kolektor terhadap energi yang diterima jika seluruh permukaan kolektor pada suhu fluida masuk. Persamaan dari bilangan ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \left[1 - e^{-\left(A_c \cdot U_L \cdot F' / \dot{m} \cdot C_p \right)} \right] \quad (2.42)$$

dimana:

- \dot{m} = laju aliran massa total pada kolektor (kg/s)
- C_p = kapasitas panas jenis fluida pada tekanan konstan (kJ/kg C)
- F' = faktor efisiensi kolektor

Sehingga energi yang berguna dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (2.43)$$

Hottel dan Whillier (1958), Whillier (1977), dan Bliss (1959) telah mengembangkan beberapa hubungan general untuk macam-macam desain susunan pipa dan kolektor. Dimana nilai dari faktor efisiensi kolektor yaitu:

$$F' = \frac{1}{\frac{WU_L}{\pi Dh} + \frac{1}{\frac{D}{W} + \frac{1}{\frac{WU_L}{C_{bond} (W-D)F}}}} \quad (2.44)$$

dimana:

W = jarak antar pipa (m)

D = diameter pipa (m)

F = faktor efisiensi sirip kolektor

U_L = koefisien kehilangan panas total dari kolektor = $U_t + U_b$

h = koefisien perpindahan panas antara pipa dengan fluida kerja

Dengan faktor efisiensi sirip kolektor dapat dihitung dengan:

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(W-D)}{2}\right)}{\frac{m(W-D)}{2}} \quad (2.45)$$

dimana:

m = faktor sambungan pipa dengan pelat kolektor $(U_L/(k.\delta))^{0,5}$

k = konduktivitas termal dari sambungan pipa dengan pelat kolektor

δ = tebal pelat

Sirkulasi dalam kolektor dimungkinkan apabila pelat kolektor cukup panas untuk menimbulkan perbedaan densitas antara fluida masuk kolektor dan keluar kolektor, termasuk saat fluida masuk ke tangki penyimpanan dari kolektor dan keluar dari tangki menuju kolektor. Perbedaan densitas merupakan fungsi dari perbedaan temperatur, dan laju alir massa adalah fungsi dari panas yang diterima dari kolektor yang menyebabkan perbedaan temperatur.

Terdapat dua alternatif metode untuk memodelkan performansi dari kolektor dalam sistem sirkulasi natural. Pertama adalah dengan menganalisa dari distribusi temperatur dan densitas kemudian menghasilkan laju aliran berdasarkan perhitungan perbedaan tekanan. Kedua, dengan mengansumsikan peningkatan temperatur konstan dari air yang mengalir melewati kolektor dan menghitung laju alir masa yang akan menimbulkan perbedaan temperatur fungsi panas yang diterima. Selain persamaan 2.43, persamaan lain yang dapat menentukan dari energi berguna adalah:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) = \dot{m}C_pT_f \quad (2.46)$$

Kemudian digunakan persamaan 2.43 dan 2.46 untuk menentukan nilai dari \dot{m} :

$$\dot{m} = \frac{A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)]}{C_p \Delta T_f} \quad (2.47)$$

Persamaan ini dapat diselesaikan jika F' tidak terikat oleh laju aliran, F_R dari persamaan 2.42 dimasukkan ke dalam persamaan 2.47 dan mendapatkan persamaan untuk mencari \dot{m} sebagai berikut:

$$\dot{m} = - \frac{U_L F' A_c}{C_p \ln \left[1 - \frac{U_L(T_o - T_i)}{S - U_L(T_i - T_a)} \right]} \quad (2.48)$$

2.5 Tangki Penyimpanan Pemanas Air Tenaga Surya

Energi matahari merupakan sumber energi yang tergantung pada waktu dan kebutuhan untuk variasi dari aplikasi yang bergantung pada waktu. Energi atau hasil dari media penyimpan bergantung pada proses sistem tenaga surya, komponen utama seperti kolektor surya, media penyimpanan, peralatan konversi seperti pengondisi udara atau mesin, muatan beban, dan sistem kontrol. Performa dari setiap komponen

tergantung pada komponen lainnya. Keterikatan dari performa kolektor kolektor pada temperatur menyebabkan keseluruhan sistem berpegang pada temperatur.

Dalam pemanasan tipe pasif, kolektor dan tangki penyimpanan merupakan satu kesatuan dengan struktur bangunan. Performa dari dinding tangki dalam sistem pemanasan pasif saling tergantung dengan energi yang diserap dari kolektor. Energi yang tersimpan optimum dari tangki penyimpanan tergantung pada ketersediaan radiasi yang berdasarkan waktu.

Energi panas dapat disimpan sebagai panas sensibel atau panas laten. Sistem penyimpanan panas sensibel memanfaatkan kapasitas panas dan perubahan suhu bahan selama proses pengisian atau pemakaian. Suhu bahan penyimpanan meningkat ketika energi diserap dan turun ketika energi terpakai.

2.5.1 Media penyimpanan panas

Penyimpanan panas dapat diklasifikasikan menurut media penyimpanannya, diantaranya adalah cairan, padat, dan gabungan antara cairan dan padatan.

1. Media penyimpanan berupa cairan

Beberapa keuntungan dari media penyimpanan ini adalah:

- Air melimpah dan murah.
- Mudah untuk perawatan, tidak beracun dan tidak mudah terbakar.
- Memiliki sifat transportasi yang sangat baik, konduktivitas termal.
- Dapat digunakan baik sebagai media penyimpanan dan fluida kerja sehingga menghilangkan penambahan alat penukar panas
- Proses penyimpanan dan pemakaian energi dapat terjadi secara bersamaan.

Kekurangan:

- Air dapat membeku di bawah 0°C atau mendidih diatas 100°C , hal ini menyebabkan membatasi kisaran suhu kerja medium.
- Merupakan media korosif.

- Sulit untuk stratifikasi.
- Memiliki tegangan permukaan yang rendah dan berpotensi menyebabkan kebocoran.

2. Media penyimpanan berupa benda padat

Media padatan yang paling sering digunakan adalah batu dengan sistem *rock bed*, dimana batu tersusun secara keseluruhan hingga memenuhi media penyimpanan. Pada dasarnya fluida kerja yang digunakan adalah berupa udara. Kerugian dan kekurangan dari media penyimpan ini adalah:

Keuntungan:

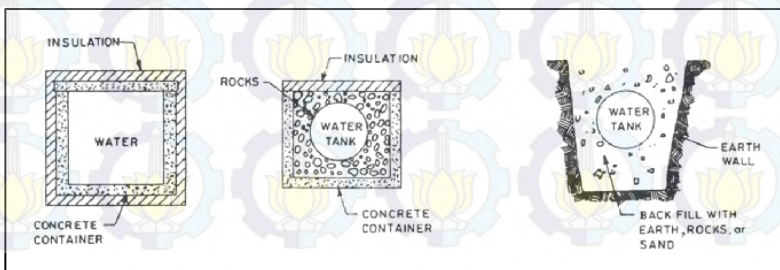
- Mudah perawatan, tidak beracun dan tidak mudah terbakar.
- Dimungkinkan dapat bekerja pada temperatur tinggi.
- Tidak ada masalah pembekuan dan korosi

Kerugian

- Volume dari penyimpanan lebih besar
- Penurunan tekanan (*pressure drop*) yang besar

3. Media penyimpanan gabungan

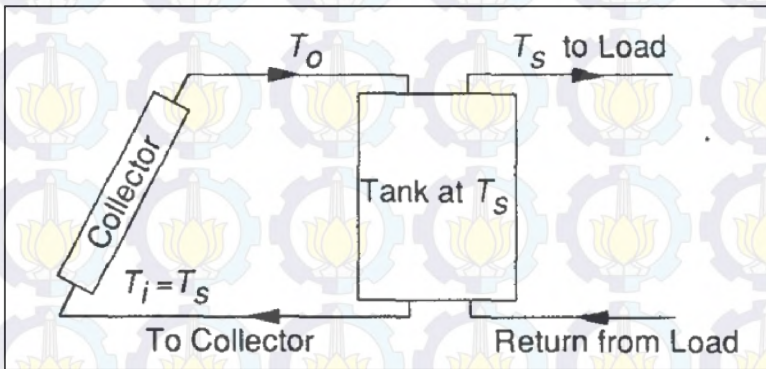
Media penyimpanan padat dan cair dapat dikombinasikan dengan beberapa cara. Salah satu cara adalah dengan menggunakan *rock bed storage* dan tangki air bersama-sama (sistem hibrida). Penyimpanan sistem dengan tangki air yang dikelilingi oleh batu telah digunakan untuk pemanas ruangan bertenaga surya. Tiga dari sistem *hybrid* telah dipelajari oleh Atomics International (USA) yang terdapat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sistem penyimpanan *hybrid* oleh Atomics International

2.5.2 Penyimpanan panas air

Untuk kebanyakan pemanas air tenaga surya, air merupakan material yang ideal untuk menyimpan panas. Energi yang ditambahkan dan keluar dari tipe penyimpanan ini merupakan media penyimpanan itu sendiri, hal ini menghilangkan penurunan temperatur antara fluida yang disalurkan dengan yang ada di dalam penyimpanan. Tipikal sistem yang digunakan dapat digambarkan oleh sistem pemanas air seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tipikal sistem penggunaan tangki penyimpanan air

Dari gambar tersebut, sirkulasi air melewati kolektor untuk menambah energi dan dikeluarkan ke penggunaan beban untuk mengurangnya. Kapasitas energi yang tersimpan dari air (atau cairan lainnya) penyimpanan pada temperatur yang sama atau *uniform* (contohnya pada tangki yang bercampur keseluruhan atau tidak ada penggolongan temperatur di dalam tangki) beroperasi pada perbedaan temperatur yang di tuliskan dalam persamaan:

$$Q_s = (mC_p)_s \Delta T_s \quad (2.49)$$

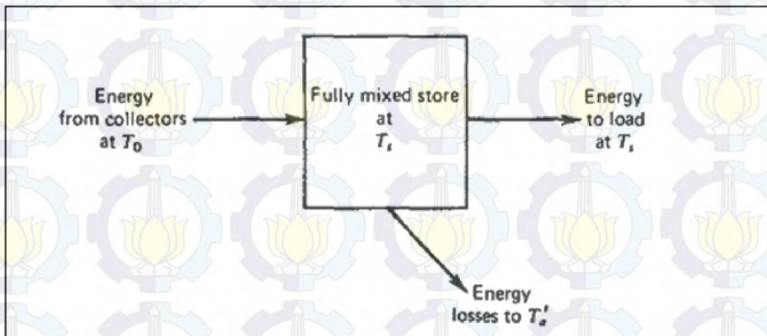
dimana Q_s adalah kapasitas panas total untuk siklus operasi bertemperatur antara ΔT_s dan m adalah massa dari air.

Untuk tipe tangki yang *nonstratified* atau tak ada perbedaan temperatur tiap lapisan tangki arah vertikal dapat

dilihat pada gambar 2.11 dan keseimbangan energi dari tangki adalah:

$$(mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u - L_s - (UA)_s (T_s - T'_a) \quad (2.50)$$

Dimana \dot{Q}_u dan L_s adalah laju dari penambahan atau pengurangan energi dari kolektor ke beban dan T'_a adalah temperatur lingkungan.



Gambar 2.11 Penyimpanan *unstratified* dari massa m beroperasi tergantung pada waktu temperatur T_s dan temperatur lingkungan T_a

Persamaan (2.50) perlu diintegral tiap waktu untuk menentukan performa dari unit penyimpan panas dan proses radiasi. Ada banyak cara yang mungkin untuk melakukannya. Menggunakan Euler intergration menjadi:

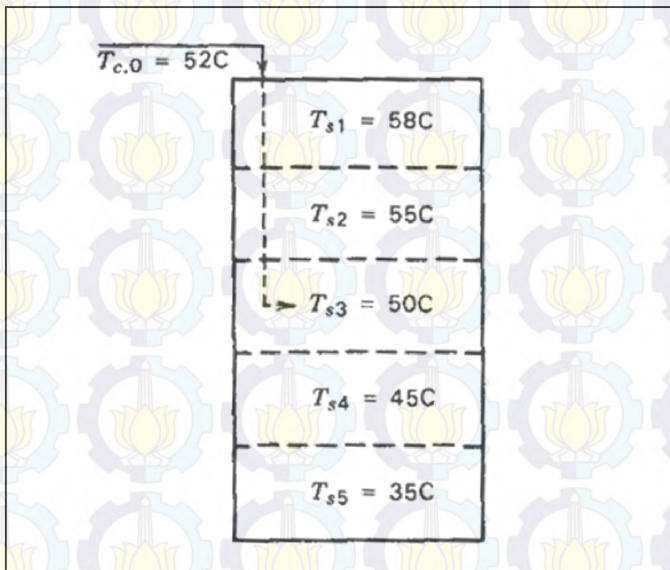
$$T_s^+ = T_s + \left(\frac{\Delta t}{(mC_p)_s} \right) \left[\dot{Q}_u - L_s - (UA)_s (T_s - T'_a) \right] \quad (2.51)$$

demikian temperatur akhir untuk satu jam dapat dihitung pada awal, dengan mengasumsi bahwa temperatur tidak berubah selama satu jam.

Tangki air mungkin beroperasi dengan *stratification* yang signifikan, dimana bagian atas dari tangki lebih panas dari pada bagian bawah. Dalam kasus ini tangki bisa dimodelkan dalam

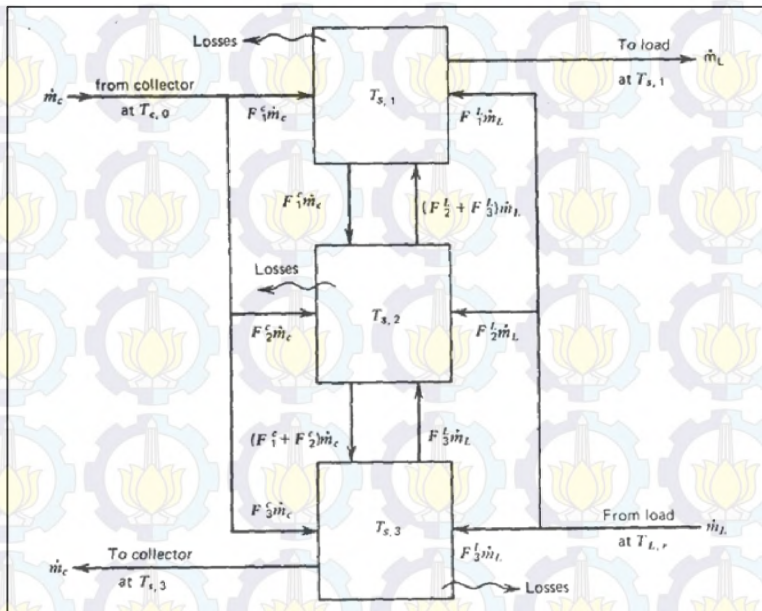
beberapa bagian dengan pembagian sebanyak N nodal (bagian). Hasil ditentukan dari persamaan diferensial N yang dapat ditentukan dari temperatur dari N sebagai fungsi waktu.

Untuk memformulasikan persamaan ini, memerlukan asumsi bagaimana distribusi air yang memasuki tangki dengan beberapa nodal. Contohnya pada tangki lima nodal seperti pada gambar 2.12, air memasuki tangki dari kolektor pada temperatur T_o besarnya diantara T_{s2} dan T_{s3} . Itu dapat diasumsikan seluruh air yang masuk akan menempati nodal 3, dimana densitasnya hampir sama. Dapat dikatakan air masuk ke nodal tiga atau menyebar ke nodal 1, 2, dan 3. Level stratifikasi hanya terjadi apabila terdapat distribusi temperatur air yang cukup signifikan. Model stratifikasi yang tinggi dapat terlihat pada gambar 2.12 dan temperatur bercampur penuh pada masing-masing nodal, itu dimungkinkan untuk membatasi kisaran dari derajat stratifikasi.



Gambar 2.12 Tangki lima nodal dengan $T_{s2} > T_{c,o} > T_{s3}$

Untuk tangki tiga nodal seperti gambar 2.13, aliran ke kolektor selalu meninggalkan tangki dari bagian bawah, nodal 3, dan aliran ke luar untuk pemakaian dari atas, nodal 1. Aliran yang dari kolektor akan menuju nodal yang paling mendekati, tetapi kurang dari temperatur keluar kolektor. Misal terdapat tiga nodal dengan temperatur masing-masing 75, 50, dan 25, yang tentunya paling panas berada di atas. Air dari kolektor yang temperatur lebih kecil dari 50 akan menuju nodal 3 dan bila diantara 50 dan 50 akan menuju nodal 2.



Gambar 2.13 Stratifikasi tiga nodal pada tangki penyimpanan

Fungsi kontrol kolektor (F_i^c) dapat dianggap sebagai penentu nodal yang mana yang akan menerima air dari kolektor, dan fungsi kontrol beban (F_i^L) digunakan untuk menentukan nodal yang mana akan menerima beban. Kestimbangan energi pada nodal i dapat di tuliskan sebagai berikut:

$$m_i \frac{dT_{s,i}}{dt} = \left(\frac{UA}{C_p} \right)_i (T_a - T_{s,i}) + F_i^c \dot{m}_c (T_{co} - T_{s,i}) + F_i^L \dot{m}_L (T_{L,r} - T_{s,i})$$

$$+ \begin{cases} \dot{m}_{m,i} (T_{s,i-1} - T_{s,i}) & \text{if } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ \dot{m}_{m,i+1} (T_{s,i} - T_{s,i+1}) & \text{if } \dot{m}_{m,i+1} < 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

Dengan besarnya jumlah nodal dari tangki yang diberikan pada persamaan 2.52 merepresentasikan level stratifikasi yang tinggi merupakan hal yang mungkin tidak dapat tercapai dalam percobaan atau eksperimen. Sangat sedikit eksperimen yang mendukung untuk menggunakan model level stratifikasi tinggi.

2.6 Performansi

Perhitungan dari performansi kolektor adalah mengenai kolektor efisiensi, didefinisikan sebagai rasio dari energi berguna dengan energi yang diterima dari kolektor surya pada periode waktu tertentu terhadap datangnya energi surya pada waktu yang sama.

- Energi terserap:
yaitu energi yang diserap oleh kolektor tiap satuan meter persegi yang dihitung dengan persamaan:

$$S = 1,01 \tau \cdot \alpha \cdot G_T \quad (2.53)$$

- Energi keluar dari kolektor:
yaitu energi yang keluar dari kolektor setelah energi diterima dikurangi loses yang terjadi.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (2.54)$$

- Efisiensi Kolektor

Efisiensi Kolektor adalah efisiensi pengumpulan panas yang dihasilkan kolektor

$$\eta_k = \frac{\int Q_u d\tau}{A_c \int G_T d\tau} \quad (2.55)$$

Efisiensi termal dari penyimpanan energi untuk pemanas air tenaga surya dapat didefinisikan sebagai rasio dari panas yang memasuki tangki dengan panas yang keluar dari tangki. Panas yang keluar dari tangki akan lebih rendah dibanding dengan panas yang masuk. Dalam kasus penyimpanan panas, suhu media disimpan turun karena kehilangan panas dan karena energi yang tersedia pada suhu yang lebih rendah. Definisi efisiensi dengan kata lain dapat diartikan sebagai rasio antara ketersediaan energi maksimum dengan ketersediaan energi dibebankan.

- Energi tersimpan
Merupakan energi yang disimpan pada tangki dari proses pemanasan pada kolektor surya

$$Q_s = (mC_p)_s T_s$$

- Efisiensi tangki penyimpanan (*storage*)
adalah efisiensi yang dihasilkan dari energi tersimpan dalam tangki terhadap panas yang dikeluarkan dari kolektor. Energi tersimpan

$$\eta_s = \frac{\int Q_s d\tau}{\int Q_u d\tau} \quad (2.57)$$

- Efisiensi total
adalah hasil perkalian antara efisiensi kolektor dengan efisiensi tangki penyimpanan

$$\eta_t = \eta_k \times \eta_s = \frac{\int Q_u d\tau}{A_c \int G_T d\tau} \times \frac{\int Q_s d\tau}{\int Q_u d\tau} = \frac{Q_s}{A_c G_T} \quad (2.56)$$



BAB III METODOLOGI

Upaya peningkatan efisiensi dari solar kolektor sudah banyak dijumpai, mulai dari penambahan reflektor, modifikasi *cover*, plat absorber dan insulasi. Sedangkan untuk tangki penyimpanan biasanya hanya ditambahkan material insulasi yang menyelubungi tangki tersebut. Namun tangki penyimpanan tersebut terkadang masih terdapat losses berupa panas yang tergantung dari material insulasi itu juga. Sistem penyimpan panas sering menggunakan material padat seperti batu, beton, dan batako. Namun, banyak dijumpai sekarang material penyimpanan panas yang dapat berubah fase atau sering disebut *Phase Change Material* (PCM).

Perlitan yang akan digunakan dibuat seminimal mungkin guna pembuatannya cukup mudah dilakukan dan diaplikasikan oleh masyarakat golongan menengah kebawah. Pada percobaan kali ini tangki penyimpan panas menggunakan kapasitas panas dari material berupa batu kerikil. Fluida yang digunakan adalah air yang disirkulasikan dari tangki penyimpanan melalui solar kolektor dan kembali ke tangki penyimpanan. Batu kerikil yang terdapat di dalam tangki menerima energi panas yang berasal dari air panas yang keluar melalui solar kolektor. Ketika solar kolektor sudah tidak menerima panas dari matahari, batu kerikil yang sudah menyimpan energi tersebut digunakan untuk memanasi air yang didalam tangki yang mengalami kehilangan panas, dapat dikatakan bahwa batu kerikil juga dapat mengurangi kehilangan panas pada malam hari dan membuat temperatur air tetap hangat lebih lama.

3.1 Perencanaan Penelitian

3.1.1 Kebutuhan material

Desain pemanas air ini meliputi dua tahap yaitu desain tangki penyimpanan dan luas permukaan kolektor surya. Desain dari tangki dipengaruhi oleh kapasitas dari tangki. Kapasitas dari tangki air tergantung dari kebutuhan air yang diperlukan.

Volume air yang dibutuhkan:

Kebutuhan penyimpanan dikhususkan untuk keperluan mandi tiap harinya. Rata-rata kebutuhan air untuk mandi (*bath or shower*) perharinya tiap orang membutuhkan 30 liter atau $0,03 \text{ m}^3$ air. Kriteria desain yang ada untuk volume pemakaian air pada tangki penyimpanan panas sebesar 140-300 liter untuk 4-5 orang dalam kondisi sumber energi panas hanya berasal dari energi surya. Jadi, volume air yang dibutuhkan untuk penyimpanan yaitu sebesar:

$$V_a = \text{jumlah orang} \times \text{volume air yang dibutuhkan per orang}$$

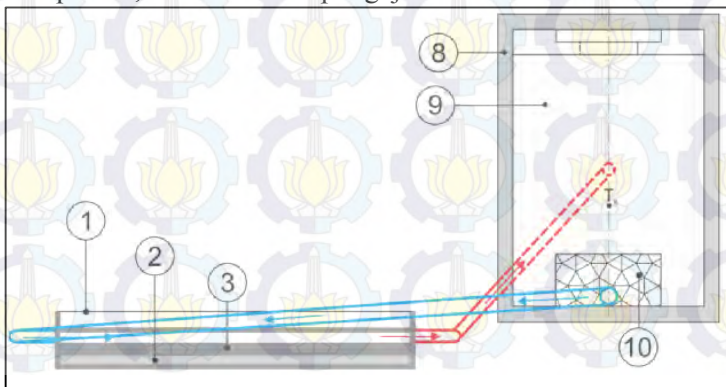
Massa air

Massa air (m_a) dihitung pada tekanan dan temperatur konstan yang nantinya tergantung pada massa jenis dari air (ρ_a) dan volume air (V_a), maka massa dari air tersebut adalah:

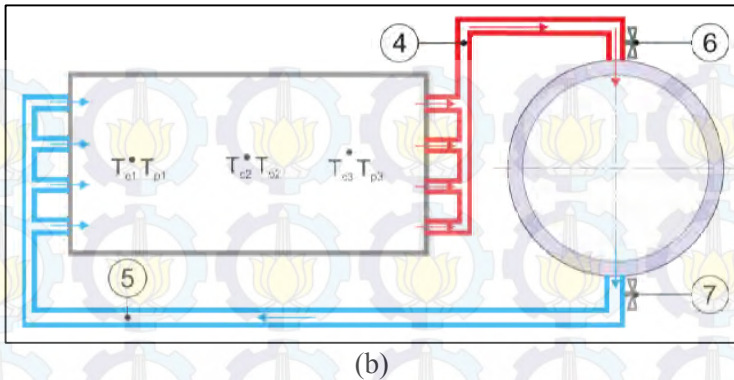
$$m_a = \rho_a \cdot V_a$$

3.1.2 Skema Percobaan

Rangkaian peralatan pemanas air tenaga surya disusun seperti yang terlihat pada gambar 3.1. Selanjutnya dibuat sebuah prototipe alat, dan dilakukan pengujian.



(a)



Gambar 3.1 Skema peralatan kolektor surya dengan tangki penyimpanan: (a) tampak samping, (b) tampak atas

Keterangan gambar:

1. Penutup kolektor surya (*cover*)
2. Insulasi pada kolektor surya
3. Pelat kolektor surya
4. Saluran air keluar kolektor surya dan masuk ke tangki penyimpanan
5. Saluran air masuk kolektor surya dan keluar ke tangki penyimpanan
6. Katup penutup saluran air yang masuk ke tangki
7. Katup penutup saluran air yang masuk ke kolektor
8. Insulasi pada tangki penyimpanan
9. Tangki penyimpanan
10. Material penyimpan panas tambahan pada tangki

Pada penelitian ini digunakan *passive solar water heater*, dimana tidak menggunakan energi tambahan atau eksternal untuk membuat air bersirkulasi, peralatan tambahan seperti pompa. Peralatan ini menggunakan prinsip natural konveksi, dengan memanfaatkan perbedaan densitas dan gaya gravitasi bumi akan menyebabkan aliran air pada SWH. Aliran konveksi alami dapat terlihat dengan tanda panah (\longrightarrow).

3.2 Peralatan dan Bahan

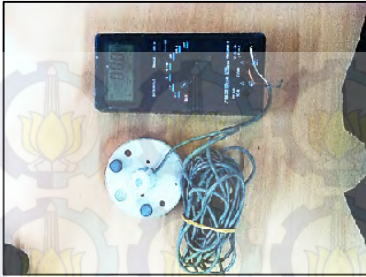
Adapun bahan yang digunakan adalah:

1. Plat Absorber, digunakan untuk menyerap panas matahari yang dicat dengan warna hitam pekat, karena secara prinsip warna hitam dapat menyerap panas tanpa menimbulkan efek radiasi pantulan ke atmosfer kembali. Plat absorber yang digunakan adalah jenis pelat daar, dengan perancangan alat yang akan di bentuk dengan ukuran sebagai berikut:
 - a. Panjang Plat Absorber = 150 cm
 - b. Lebar Plat Absorber = 75 cm
 - c. Tebal Plat Absorber = 0,3 mm
2. Pipa Kolektor, digunakan untuk menyerap panas matahari yang dicat dengan warna hitam pekat, karena secara prinsip warna hitam dapat menyerap panas tanpa menimbulkan efek radiasi pantulan ke atmosfer kembali. Dengan demikian penulis mencoba merancang alat yang akan dibentuk dengan ukuran sebagai berikut:
 - a. Diameter Luar Pipa = 16 mm
 - b. Diameter Dalam Pipa = 14 mm
 - c. Jarak antara Pipa Kolektor = 187,5 mm
 - d. Jumlah Pipa Kolektor = 4 buah
3. Isolator, digunakan untuk mengisolir panas matahari yang ditangkap oleh kolektor. Dalam pembuatan ini penulis menggunakan *styrofoam* (gabus) pada sisi kolektor bagian bawah dan samping
 - a. Tebal insulasi = 5 cm
4. *Glass Cover* (penutup kaca), digunakan untuk mengurung suhu udara panas yang berada di dalam kolektor agar tidak keluar
 - a. Panjang *Glass Cover* = 150 cm
 - b. Lebar *Glass Cover* = 75 cm
 - c. Tebal *Glass Cover* = 3 mm

5. Kerangka Kolektor, digunakan untuk menyangga dan sebagai tempat peletakan kolektor surya , terbuat dari bahan kayu dengan ukuran sebagai berikut:
 - a. Panjang Kerangka Kolektor = 155 cm
 - b. Lebar Kerangka Kolektor = 80 cm
 - c. Tinggi Kerangka Kolektor = 11 cm
6. Tangki Penyimpanan, merupakan tangki penyimpanan air yang digunakan untuk tempat menyimpan panas dari kolektor surya. Tangki ini merupakan tangki yang dijual di pasaran dengan spesifikasi:
 - a. kapasitas = 250 liter
 - b. tinggi = 80 cm
 - c. diameter = 65 cm
 - d. volume air yang digunakan sebesar 150 liter.
7. Batu kerikil, merupakan material penyimpan panas tambahan yang nantinya akan diletakkan di dalam tangki penyimpanan. Batu kerikil yang digunakan adalah tipe *limestone* (batu koral). Disediakan batu sebanyak 100 kg.

Sedangkan peralatan ukur yang digunakan pada pengujian kali ini adalah:

1. *Pyranometer*, digunakan untuk mengukur intensitas radiasi matahari yang mencapai bidang. Untuk pembacaan pyranometer digunakan multimeter digital dengan ketelitian 0,01 mV
2. *Anemometer*, digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang nantinya berkaitan dengan perhitungan kehilangan panas
3. *Thermocouple digital*, digunakan untuk mengetahui masing-masing temperatur di setiap titik pengambilan data yang sudah ditentukan
4. *Rangkaian thermoselector*, digunakan sebagai *switch* untuk masing-masing titik *thermocouple*.



Gambar 3.2 Pyranometer



Gambar 3.3 Anemometer digital



Gambar 3.4 Batu yang digunakan dalam penelitian

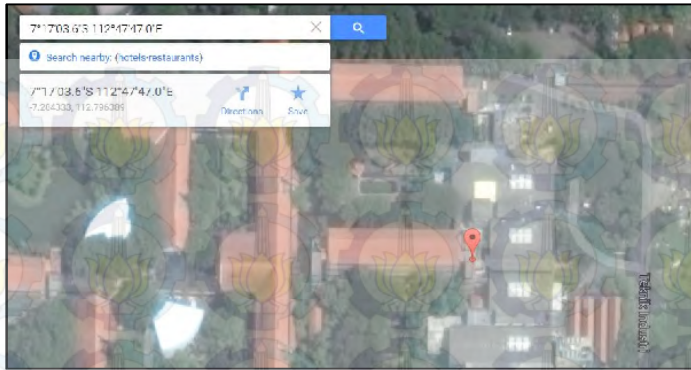


Gambar 3.5 Thermocouple digital

3.3 Prosedur Pengujian

Ada beberapa fokus pada prosedur percobaan kali ini. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam prosedur yang dilakukan selama pengujian adalah sebagai berikut:

- Percobaan dilakukan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan letak geografis $7,17^0$ LS dan $112,47^0$ BT. Gambar 3.2 menggambarkan letak geografis dari Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang didapat dari *software* Google Maps.



Gambar 3.6 Letak geografis Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS berdasarkan *software* Google Maps

- Dilakukan lima kali pengujian.
- Pengujian dilakukan berdasarkan jumlah material penyimpan panas tambahan pada tangki. Variasi pada penelitian kali ini adalah massa dari batu, dan dipilih lima jumlah massa batuan yang berbeda.
- Waktu pengujian dimulai dari jam 07.00 WIB.
- Pada saat matahari tenggelam katup ditutup.

Langkah-langkah pada pengujian ini adalah sebagai berikut:

A. Tahap Persiapan

1. Solar kolektor dan tangki diatur seperti pada instalasi percobaan.
2. Katup saluran air dibuka.
3. Saluran air dicek kebocorannya dengan mengisi air pada saluran air yang ada.
4. Pengecekan peralatan dilakukan untuk memastikan peralatan berfungsi dengan baik, yang meliputi pyranometer, anemometer, thermocouple digital, thermometer laser.
5. Pengambilan data siap dilakukan

B. Tahap Pengambilan Data

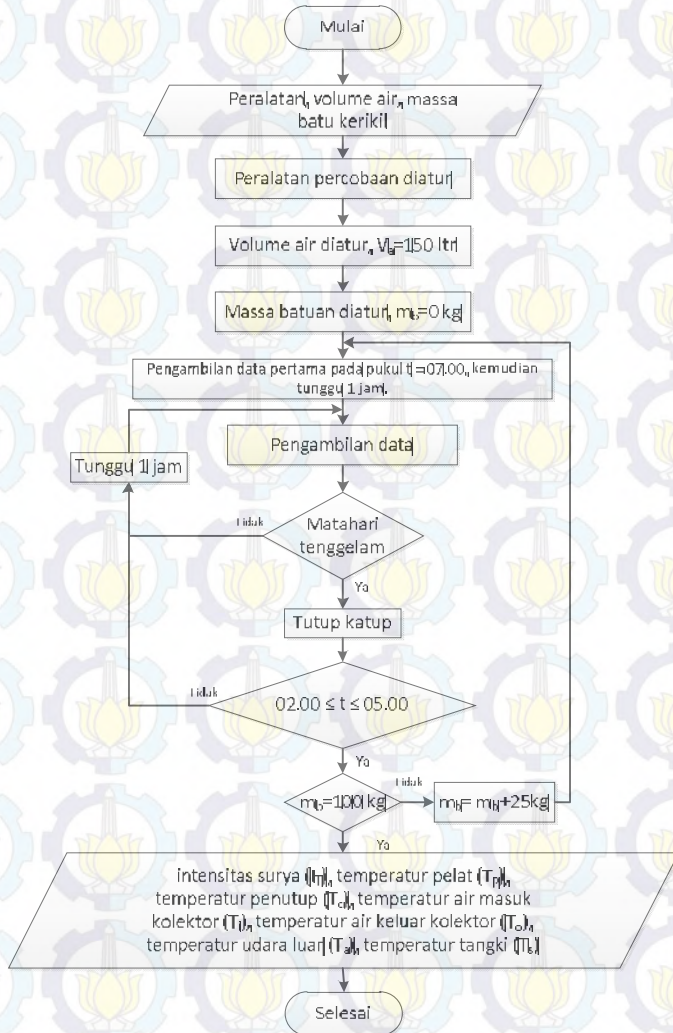
1. Volume air pada tangki diatur sebanyak 150 liter.
2. Variasi dilakukan dengan menambahkan batu kerikil. Penambahan batu kerikil yaitu sebesar 0 kg, hingga 100 kg dengan kenaikan massa sebesar 25 kg. Batu ditempatkan di dasar tangki penyimpanan.
3. Pengambilan data dilakukan pada pukul 07.00 hingga 02.00 WIB dengan selang waktu 1 jam.
4. Pengukuran yang dilakukan meliputi intensitas surya (I_T), temperatur pelat (T_p), temperatur penutup (T_c), temperatur air masuk kolektor (T_i), temperatur air keluar kolektor (T_o), temperatur udara luar (T_a), temperatur tangki (T_s), kecepatan angin (V_w), dan ditulis pada lembar data percobaan seperti gambar 3.7.
5. Keran penghubung antara kolektor surya dengan tangki penyimpanan ditutup ketika matahari tenggelam.
6. Pengukuran pada bagian kolektor surya dilakukan hingga sore hari, tepatnya ketika tidak ada sinar matahari mengenai kolektor surya (saat tidak ada energi masuk). Pengukuran bagian tangki penyimpanan (hanya T_s , T_a , V_w) dilakukan hingga pukul 02.00 WIB.
7. Apabila pengambilan data telah selesai, air dan material penyimpan panas tambahan dikeluarkan.

Lembar Data Penelitian															
Tanggal :		Massa Batu :													
No	Waktu	T _a	T _{s1}	T _{s2}	V _w	T _i	T _o	T _{p1}	T _{p2}	T _{p3}	T _{c1}	T _{c2}	T _{c3}	G _T	Keterangan
1	07.00														
2	08.00														
3	09.00														
4	10.00														
5	11.00														
6	12.00														
7	13.00														
8	14.00														
9	15.00														
10	16.00														
11	17.00														

Gambar 3.7 Contoh lembar data percobaan

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir (*flow chart*) dari penelitian ini:



Gambar 3.8 Diagram alir penelitian

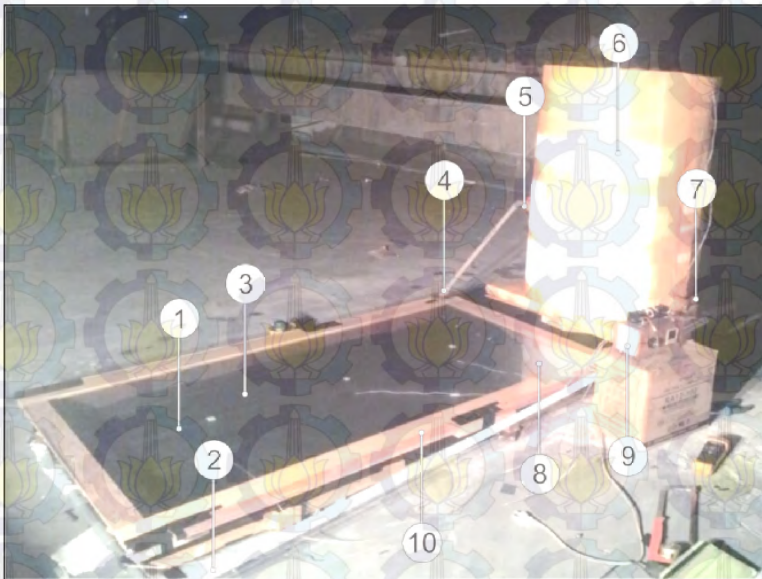


BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Alat Penelitian Pemanas Air Tenaga Surya

Kolektor surya yang dibuat adalah tipe kolektor surya plat datar dengan satu *Glass Cover* dan aliran fluida berada di atas pelat absorber. Kolektor surya dirangkai dengan tangki penyimpanan yang disambungkan dengan pipa. Hal tersebut terlihat seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 4.1 Rangkaian alat pengujian pemanas air tenaga surya

Keterangan gambar:

1. Pipa kolektor diatas pelat absorber
2. Saluran air masuk kolektor surya
3. Pelat kolektor surya yang dicat hitam pekat
4. Saluran air keluar kolektor surya
5. Katup penutup saluran air yang masuk ke tangki

6. Tangki penyimpanan yang telah dilapisi insulasi
7. Katup penutup saluran air yang masuk ke kolektor
8. Penutup kolektor berbahan kaca
9. Rangkaian termocouple untuk mengukur temperatur
10. Kerangka kolektor

Sedangkan dimensi kolektor surya tersebut adalah sebagai berikut:

- Panjang kolektor surya (P) : 150 cm
- Lebar kolektor Surya (L) : 75 cm
- Tebal pelat (δ) : 0,3 mm
- Konduktivitas termal pelat : 116 W/mK
- Jarak antara plat absorber dan *Glass Cover* (h) : 5 cm
- Luas kolektor surya (A_c) : 1,125 m²
- Pipa pengalir fluida, berjumlah 4 buah terbuat dari tembaga
 - Diameter Luar (D_o) : 1,27 cm
 - Diameter Dalam (D_i) : 1,14 cm
 - Panjang (P_p) : 145 cm
 - Konduktivitas termal (k_{pipa}) : 401 W/m.K
- *Glass Cover* (kaca penutup), terbuat dari kaca transparan dengan tebal 0,3 cm
 - Transmisivitas (τ_c) : 0,79
 - Emisivitas (ϵ_c) : 0,90
- Plat absorber terbuat dari seng yang dicat hitam pekat.
 - Absorbsivitas (α_p) : 0,98
 - Emisivitas (ϵ_p) : 0,98
- Insulasi kolektor, terbuat dari styrofoam dengan tebal (H) 5 cm, konduktivitas termal, $k_{\text{styrofoam}}$: 0,04 W/m.K
- Tangki penyimpanan
 - Kapasitas : 250 Liter
 - Diameter (D) : 65 cm
 - Tinggi (t) : 80 cm

- Insulasi tangki, terbuat dari styrofoam dengan tebal 3 cm konduktifitas termal, $k_{\text{styrofoam}}: 0,04 \text{ W/m.K}$

4.2 Data Hasil Penelitian

Penelitian eksperimen pemanas air tenaga surya dengan penambahan material penyimpan panas dilakukan di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS dengan memvariasikan jumlah massa batuan yang ditambahkan ke dalam tangki penyimpanan yaitu sebesar 0 kg, 25 kg, 50 kg, 75 kg, dan 100 kg. Data pengujian dan hasil perhitungan ditampilkan dalam tabel pada lembar lampiran.

4.3 Perhitungan

Berdasarkan data yang diperoleh, dilakukan perhitungan untuk mengetahui performansi dari pemanas air tenaga surya. Kemudian dilakukan analisa berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan.

Adapun data yang digunakan pada contoh perhitungan adalah data yang diambil dari hasil pengujian pada tanggal 21 Mei 2015 pukul 09.00 WIB, yakni sebagai berikut:

Lembar Data Penelitian																			
Tanggal: 21 Mei 2015										Massa batu: 0 kg									
No	Waktu	Ta °C	Ts1 °C	Ts2 °C	Ts °C	Vw m/s	Ti °C	To °C	Tp1 °C	Tp2 °C	Tp3 °C	Tp °C	Tc1 °C	Tc2 °C	Tc3 °C	Tc °C	Gr		Keterangan Cuaca
																	mV	W/m2	
1	07.00	28	30,4	31,9	31,2	0	30	32	48,1	47,7	50,6	48,8	29,3	29,3	32,3	30,3	2,1	275	Cerah
2	08.00	31,5	30,6	38,1	34,4	0,1	30	43,9	71,2	72,5	76,9	73,5	42,3	41,3	43,4	42,3	3,3	431	Cerah
3	09.00	32,5	31,2	41,4	36,3	0,1	31,2	45,3	84,2	88,7	91,8	88,2	49,7	51,6	55,1	52,1	4,8	627	Cerah
4	10.00	35	32,4	45,2	38,8	0,3	31,8	45,5	91,6	96,9	101,3	96,6	57,1	57,6	62,5	59,1	5,7	745	Cerah
5	11.00	36,5	33,7	44,1	38,9	2,2	33,2	44,7	93,2	99	103,6	98,6	56,2	56,8	61,9	58,3	6	784	Cerah

Gambar 4.2 Contoh data yang diambil untuk perhitungan

1. Temperatur udara ambient, $T_a: 32,5^\circ\text{C} = 305,5 \text{ K}$
2. Kecepatan angin, $V_w: 0,1 \text{ m/s}$
3. Temperatur air dalam tangki, $T_s: 36,3^\circ\text{C} = 309,3 \text{ K}$
4. Temperatur pelat absorber, $T_p: 88,2^\circ\text{C} = 361,2 \text{ K}$
5. Temperatur kaca penutup, $T_c: 52,1^\circ\text{C} = 325,1 \text{ K}$
6. Temperatur masuk kolektor, $T_i: 31,2^\circ\text{C} = 304,2 \text{ K}$
7. Temperatur keluar kolektor, $T_o: 45,3^\circ\text{C} = 318,3 \text{ K}$
8. Intensitas matahari, $G_T: 4,8 \text{ mV} = 4,8 \times \text{faktor konversi pyranometer } \text{W/m}^2 = 627,5 \text{ W/m}^2$

Dan ada beberapa nilai yang digunakan pada perhitungan, diantaranya adalah:

1. percepatan gravitasi bumi, g : $9,81 \text{ m/s}^2$
2. konstanta Stevan-Boltzmann, σ : $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

Berikut adalah contoh perhitungan yang dilakukan:

4.3.1 Perhitungan bagian kolektor

- Perhitungan intensitas radiasi matahari yang mengenai pelat *absorber* (S).

$$S = 1,01 \cdot \tau_c \cdot \alpha_p \cdot G_T$$

$$S = 1,01 \cdot 0,79 \cdot 0,98 \cdot 627,6 = 490,6 \text{ W/m}^2$$

- Perhitungan koefisien radiasi antara kaca penutup dengan ambient ($h_{r,c-a}$).

Temperatur langit (sky):

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$$

$$T_{sky} = 0,0552 (305,5)^{1,5} = 294,8 \text{ K}$$

$$h_{r,c-a} = \frac{\varepsilon_c \cdot \sigma (T_c + T_{sky}) (T_c^2 - T_{sky}^2) (T_c - T_{sky})}{(T_c - T_a)}$$

$$h_{r,c-a} = \frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (325,1 + 294,8) (325,1^2 - 294,8^2) (325,1 - 294,8)}{(325,1 - 305,5)}$$

$$= 6,09 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

- Perhitungan koefisien konveksi akibat angin pada kaca penutup (h_w).

Panjang karakteristik kaca:

$$L = \frac{4 \cdot A_s}{P} = \frac{4 \cdot (1,5 \cdot 0,75)}{2(1,5 + 0,75)} = 1 \text{ m}$$

A_s = luas dari kaca penutup

P = keliling dari kaca penutup

Temperatur film dari kaca penutup dan ambient:

$$T_f = \frac{T_a + T_c}{2} = \frac{32,5 + 52,1}{2} = 42,3^\circ \text{C} = 315,3 \text{ K}$$

Berdasarkan T_f , dari tabel *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure* didapatkan data sebagai berikut:

$$\rho = 1,1181 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 2,43243\text{E-}05 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 1,91043\text{E-}05 \text{ Pa.s}$$

$$k = 0,027 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 0,70$$

Sehingga:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{1,1181 \cdot 0,1 \cdot 1}{1,91 \cdot 10^{-5}} = 5853$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T_{c-a} \cdot L^3}{\nu^2} = \frac{g \cdot \left(\frac{1}{T_f} \right) \cdot \Delta T_{c-a} \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^2}$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{315,3} \right) \cdot 19,6 \cdot 1^3}{\left(\frac{1,91 \cdot 10^{-5}}{1,1181} \right)^2} = 2092196834$$

$$Ra_L = Gr \cdot Pr$$

$$Ra_L = 2092196834 \cdot 0,70 = 1462114322$$

$$\frac{Gr}{(Re_L)^2} = \frac{2092196834}{(5853)^2} = 61,08$$

Jika $\frac{Gr}{(Re_L)^2} \ll 1$ maka *forced convection* dan $\frac{Gr}{(Re_L)^2}$

$\gg 1$ *free convection*

Untuk *free convection* nilai dari *nusselt number* adalah:

$$Nu = 0,15 Ra^{1/3}$$

$$Nu_L = 0,15 Ra_L^{1/3} = 0,15 \cdot (1462114322)^{1/3} = 170$$

$$h_w = \frac{Nu_L \cdot k}{L} = \frac{170 \cdot 0,027}{1} = 4,66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan koefisien konveksi antara kaca penutup dengan pelat *absorber* (h_{p-c}).

Koefisien perpindahan panas konveksi antara kaca penutup dan pelat *absorber* yang terjadi adalah konveksi alami (*natural convection*). Dari tabel *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure* dengan temperatur rata-rata dari pelat *absorber* dan kaca penutup:

$$T_f = \frac{T_c + T_p}{2} = \frac{52,1 + 88,2}{2} = 70,2^\circ\text{C} = 343,2 \text{ K}$$

didapat data hasil interpolasi sebagai berikut:

$$\rho = 1,02 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 0,000029 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 2,04983 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$k = 0,03 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 0,701$$

Sehingga:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T_{p-c} \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} = \frac{g \cdot \left(\frac{1}{T_f} \right) \cdot \Delta T_{p-c} \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \alpha}$$

$$Ra = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{343,2} \right) \cdot 36,1 \cdot 0,05^3}{\left(\frac{0,0000204983}{1,02} \right) \cdot 0,000029} = 221663$$

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \beta} \right]^+ \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin 1,86 \beta)^{1,6}}{Ra \cdot \cos \beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

Dengan $\beta = 0^0$, maka

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{221663} \right]^+ [1] + \left[\left(\frac{221663}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ = 5,79$$

$$h_{p-c} = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{5,79 \cdot 0,03}{0,05} = 3,42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan koefisien radiasi antara pelat *absorber* dan kaca penutup ($h_{r,p-c}$).

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma (T_p - T_c) (T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}$$

$$h_{r,p-c} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (361,2 - 325,1) (361,2^2 + 325,1^2)}{\frac{1}{0,98} + \frac{1}{0,9} - 1} = 8,12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan tahanan termal dari penutup ke lingkungan (R_1).

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}}$$

$$R_1 = \frac{1}{4,66 + 6,09} = 0,093 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan tahanan termal dari pelat penyerap ke penutup (R_2).

$$R_2 = \frac{1}{h_{p-c} + h_{r,p-c}}$$

$$R_2 = \frac{1}{3,42 + 8,12} = 0,0867 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan koefisien kehilangan energi sisi atas (U_t).

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2}$$

$$U_t = \frac{1}{0,093 + 0,0867} = 5,57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan koefisien kehilangan panas sisi bawah (U_b).

$$U_b = \frac{1}{R_3} = \frac{k_{styrofoam}}{H}$$

$$U_b = \frac{0,04}{0,05} = 0,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan koefisien kehilangan panas total (U_L).

$$U_L = U_i + U_b$$

$$U_L = 5,57 + 0,8$$

$$U_L = 6,37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan koefisien konveksi antara pipa kolektor dengan fluida (h).

Perpindahan panas konveksi antara kaca penutup dan pelat *absorber* yang terjadi adalah konveksi alami (*natural convection*). Dari tabel *properties of saturated water* dengan temperatur rata-rata dari pelat *absorber* dan kaca penutup:

$$T_f = \frac{T_i + T_o}{2} = \frac{31,2 + 45,3}{2} = 38,25^\circ\text{C} = 311,25 \text{ K}$$

didapat data hasil interpolasi sebagai berikut:

$$\rho = 996 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 1,5\text{E-}7 \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 0,00069 \text{ Pa.s}$$

$$k = 0,63 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 4,57$$

Sehingga:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu \cdot \alpha} = \frac{g \cdot \left(\frac{1}{T_f} \right) \cdot \Delta T \cdot D^3}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \alpha}$$

$$Ra = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{311,25} \right) \cdot 14,1 \cdot 0,0127^3}{\left(\frac{0,00069}{996} \right) \cdot 1,5 \cdot 10^{-7}} = 4290504$$

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \beta} \right]^+ \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin 1,86 \cdot \beta)^{1,6}}{Ra \cdot \cos \beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

Dengan $\beta = 0^0$, maka

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{4290504} \right]^+ [1] + \left[\left(\frac{4290504}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ = 11,47$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{11,47 \cdot 0,63}{0,0127} = 629 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Perhitungan faktor efisiensi kolektor, (F').
Faktor sambungan pipa dengan pelat kolektor (m).

$$m = \left(\frac{U_L}{k \cdot \delta} \right)^{0,5}$$

$$m = \left(\frac{6,37}{116 \cdot 0,001} \right)^{0,5} = 7,41$$

Faktor efisiensi sirip (F)

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(W-D)}{2}\right)}{\frac{m(W-D)}{2}}$$

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{7,41(0,1875 - 0,0127)}{2}\right)}{\frac{7,41(0,1875 - 0,0127)}{2}} = 0,88$$

Konduktivitas sambungan termal per-satuan panjang

$$C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma} = \frac{429 \cdot 32}{0,001} = 137280 \text{ W/mK}$$

k_b = konduktivitas termal dari sambungan pipa-pelat

b = lebar dari sambungan

γ = tebal dari sambungan

$$F' = \frac{1}{\frac{WU_L}{\pi Dh} + \frac{1}{\frac{D}{W} + \frac{1}{\frac{WU_L}{C_b} + \frac{1}{(W-D)F}}}} = 0,240$$

$$F' = \frac{\frac{0,1875 \cdot 6,37}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 629} + \frac{0,0127}{0,1875} + \frac{1}{\frac{0,1875 \cdot 6,37}{137280} + \frac{0,1875}{(0,1875 - 0,0127) \cdot 0,88}}}{1} = 0,240$$

- Perhitungan *collector heat removal factor* (F_R)

Dengan temperatur rata-rata dalam kolektor

$$T_{mf} = \frac{T_i + T_o}{2} = \frac{45,3 + 31,2}{2} = 38,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

didapat $C_p = 4178 \text{ J/kg.K}$

Laju alir massa dalam kolektor (\dot{m})

$$\dot{m} = - \frac{U_L F' A_c}{C_p \ln \left[1 - \frac{U_L (T_o - T_i)}{S - U_L (T_i - T_a)} \right]}$$

$$\dot{m} = - \frac{6,37 \cdot 0,240 \cdot 1,125}{4178 \ln \left[1 - \frac{6,37(45,3 - 31,2)}{490,6 - 6,37(30 - 28)} \right]} = 0,00208 \text{ kg/s}$$

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \left[1 - e^{-(A_c \cdot U_L \cdot F' / \dot{m} \cdot C_p)} \right]$$

$$F_R = \frac{0,00208 \cdot 4178}{1,125 \cdot 6,37} \left[1 - e^{-(1,125 \cdot 6,37 \cdot 0,240 / 0,00208 \cdot 4178)} \right]$$

$$= 0,218$$

- Perhitungan Energi berguna (Q_u)

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)]$$

$$Q_u = 1,125 \, 0,218 [490,6 - 6,37(31,2 - 32,5)]$$

$$Q_u = 122,4 \text{ W}$$

4.3.2 Perhitungan bagian tangki penyimpanan

- Perhitungan koefisien perpindahan panas sisi atas $(UA)_{ts}$
Perhitungan tahanan termal konduksi akibat insulasi

$$R_1 = \frac{l}{k_{styrafoam} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{0,03 \cdot 4}{0,04 \cdot \pi \cdot 0,65^2} = 2,17 \text{ K/W}$$

Perhitungan tahanan termal konveksi akibat angin (h_w) pada tangki

Temperatur film dari tangki dan ambient:

$$T_f = \frac{32,5 + 36,3}{2} = 34,4^\circ\text{C} = 307,4 \text{ K}$$

Berdasarkan T_f , dari tabel *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure* didapatkan data sebagai berikut:

$$\rho = 1,1486 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$k = 0,0268 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 0,7028$$

Sehingga:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{1,1486 \cdot 0,1 \cdot 0,65}{0,000019} = 3982$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta' \Delta T \cdot D^3}{v^2} = \frac{g \cdot \left(\frac{1}{T_f} \right) \cdot \Delta T \cdot D^3}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^2}$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{307,4} \right) \cdot 3,8 \cdot 0,65^3}{\left(\frac{0,000019}{1,1486} \right)^2} = 1,2 \cdot 10^8$$

$$Ra_D = Gr \cdot Pr$$

$$Ra_D = 1,2 \cdot 10^8 \cdot 0,7028 = 8,8 \cdot 10^7$$

$$\frac{Gr}{(Re_D)^2} = \frac{1,2 \cdot 10^8}{(3982)^2} = 7,88$$

Jika $\frac{Gr}{(Re)^2} \ll 1$ maka *forced convection*

dan $\frac{Gr}{(Re)^2} \gg 1$ *free convection*

Untuk *free convection* nilai dari *nusselt number* adalah:

$$Nu = 0,125 Ra^{0,333}$$

$$Nu = 0,125 Ra_L^{1/3} = 0,125 \cdot (8,8 \cdot 10^7)^{0,333} = 55$$

$$h_w = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{55 \cdot 0,0268}{0,65} = 2,28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_w \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{4}{2,28 \cdot \pi \cdot 0,65^2} = 1,32 \text{ K/W}$$

$$(UA)_{is} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2,17 + 1,32} = 0,3 \text{ W/K}$$

- Perhitungan koefisien perpindahan panas sisi samping

$(UA)_{es}$

Perhitungan tahanan termal konduksi akibat insulasi

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{styrofoam} \cdot 2 \cdot \pi \cdot t} = \frac{\ln\left(\frac{0,355}{0,325}\right)}{0,04 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,8} = 0,439 \text{ K/W}$$

Perhitungan tahanan termal konveksi akibat angin (h_w) pada tangki sisi samping

Temperatur film dari tangki dan ambient:

$$T_f = \frac{32,5 + 36,3}{2} = 34,4^\circ\text{C} = 307,4 \text{ K}$$

Berdasarkan T_f , dari tabel *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure* didapatkan data sebagai berikut:

$$\rho = 1,1486 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

$$\mu = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$k = 0,0268 \text{ W/m.K}$$

$$Pr = 0,7028$$

Sehingga:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{1,1486 \cdot 0,1 \cdot 0,65}{0,000019} = 3982$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu^2} = \frac{g \cdot \left(\frac{1}{T_f} \right) \cdot \Delta T \cdot D^3}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^2}$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{307,4} \right) \cdot 3,8 \cdot 0,65^3}{\left(\frac{0,000019}{1,1486} \right)^2} = 1,2 \cdot 10^8$$

$$Ra_D = Gr \cdot Pr$$

$$Ra_D = 1,2 \cdot 10^8 \cdot 0,7028 = 8,8 \cdot 10^7$$

$$\frac{Gr}{(Re_D)^2} = \frac{1,2 \cdot 10^8}{(3982)^2} = 7,88$$

Jika $\frac{Gr}{(Re)^2} \ll 1$ maka *forced convection* dan $\frac{Gr}{(Re)^2} \gg 1$

free convection

Untuk *free convection* nilai dari *nusselt number* adalah:

$$Nu = 0,125 Ra^{0,333}$$

$$Nu = 0,125 Ra_L^{1/3} = 0,125 \cdot (8,8 \cdot 10^7)^{0,333} = 55$$

$$h_w = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{55 \cdot 0,0268}{0,65} = 2,28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_w \cdot \pi \cdot D \cdot t} = \frac{1}{2,28 \cdot \pi \cdot 0,65 \cdot 0,8} = 0,268 \text{ K/W}$$

$$(UA)_{es} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{0,439 + 0,268} = 1,4144 \text{ W/K}$$

- Perhitungan koefisien perpindahan panas sisi bawah $(UA)_{bs}$

$$(UA)_{bs} = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{l}{k \cdot A}} = \frac{k_{styrofoam} \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot l} = \frac{0,04 \cdot \pi \cdot 0,65^2}{4 \cdot 0,03} = 0,442 \text{ W/K}$$

- Perhitungan koefisien perpindahan panas total pada tangki $(UA)_s$

$$(UA)_s = (UA)_{ts} + (UA)_{es} + (UA)_{bs}$$

$$(UA)_s = 0,3 + 1,4144 + 0,442 = 2,16 \text{ W/K}$$

- Perhitungan perubahan energi tersimpan pada tangki (dE_{st}/dt)

Perubahan energi tersimpan merupakan besarnya energi yang ditambahkan ke dalam tangki penyimpanan atau berkurangnya energi akibat adanya kerugian kehilangan panas.

$$(mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u - (UA)_s (T_s - T_a')$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \dot{Q}_u - (UA)_s (T_s - T_a') = \dot{Q}_s$$

$$\dot{Q}_S = \frac{dE_{st}}{dt} = 122,4 - (2,2)(36,3 - 32,5) = 114 \text{ W}$$

4.3.3 Perhitungan efisiensi

- Perhitungan efisiensi kolektor
Efisiensi kolektor didasari dari perbandingan antara energi yang berguna dengan perkalian luasan kolektor dan intensitas matahari yang tersedia selama satu hari pengujian.

$$\eta_k = \frac{\int Q_u d\tau}{A_c \int G_T d\tau}$$

Dimana $\int Q_u$ merupakan Q_u hasil perhitungan yang dihitung tiap jam kemudian dijumlahkan dalam satu kali pengujian. Dari hasil perhitungan didapat $\int Q_u = 1024 \text{ W}$ dan $\int G_T = 6191,2 \text{ W}$ sehingga

$$\eta_k = \frac{1024}{1,125 \cdot 6191,2} = 0,15 = 15\%$$

- Perhitungan efisiensi penyimpanan
Efisiensi penyimpanan merupakan perbandingan antara energi tersimpan dengan energi yang diterima selama satu hari pengujian. Energi tersimpan dalam konteks ini merupakan perubahan energi tersimpan dalam tangki, sedangkan energi yang diterima merupakan energi berguna hasil dari kolektor surya.

$$\eta_s = \frac{\int Q_s d\tau}{\int Q_u d\tau}$$

Dari hasil perhitungan didapat $\int Q_s = 680,8$ sehingga

$$\eta_s = \frac{680,8}{1024} = 0,66 = 66\%$$

- Perhitungan efisiensi total

Efisiensi total merupakan efisiensi keseluruhan alat, berupa perbandingan antara energi tersimpan dengan energi yang tersedia. Dapat juga dirumuskan dengan perkalian antara efisiensi kolektor dengan efisiensi penyimpanan.

$$\eta_t = \eta_k \times \eta_s = \frac{\int Q_u d\tau}{A_c \int G_T d\tau} \times \frac{\int Q_s d\tau}{\int Q_u d\tau} = \frac{Q_s}{A_c G_T}$$

$$\eta_t = \eta_k \times \eta_s = 0,15 \times 0,66$$

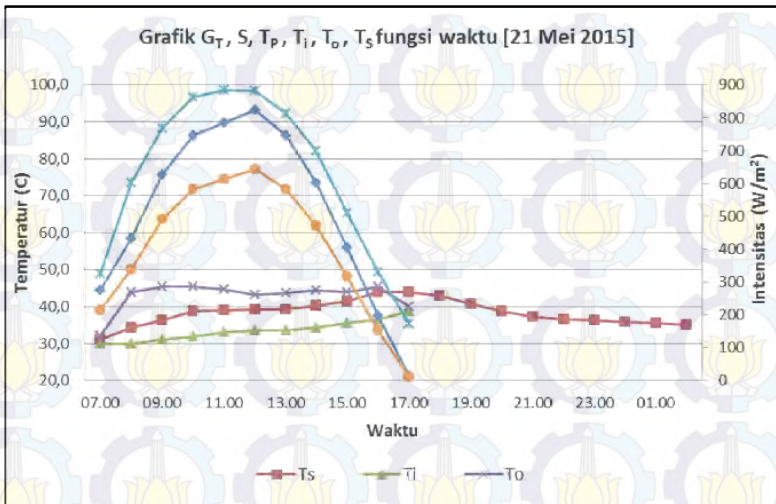
$$\eta_t = 0,1 = 10\%$$

Selanjutnya dengan cara yang sama untuk data yang lain maka hasil perhitungan ditabelkan dalam lembar lampiran.

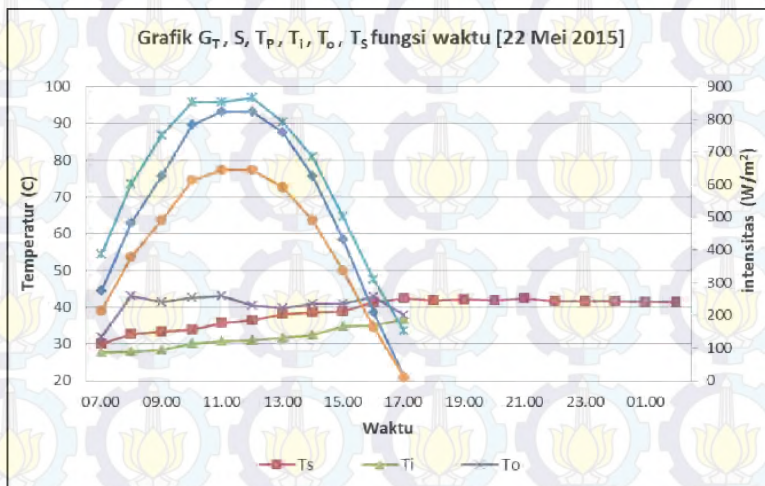
4.4 Analisa Data

Dalam penelitian ini dilakukan lima kali pengujian, yaitu dari variasi jumlah massa batuan yang digunakan. Pada satu kali pengujian membutuhkan waktu dari pagi hingga keesokan harinya. Pada penelitian ditetapkan pengambilan data dimulai dari jam 07.00 WIB hingga jam 02.00 WIB. Data yang diperoleh kemudian melalui proses perhitungan seperti pada poin 4.3 dan dibuat visualisai grafik untuk memudahkan dalam proses pengamatan data.

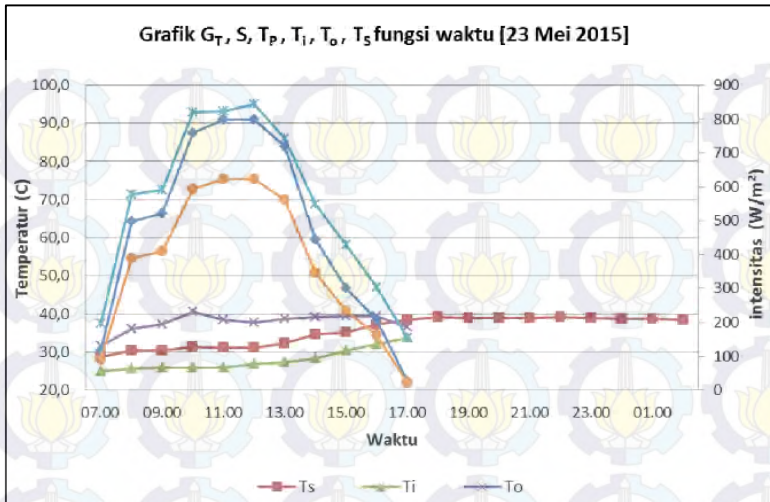
4.4.1 Analisa grafik data hasil penelitian



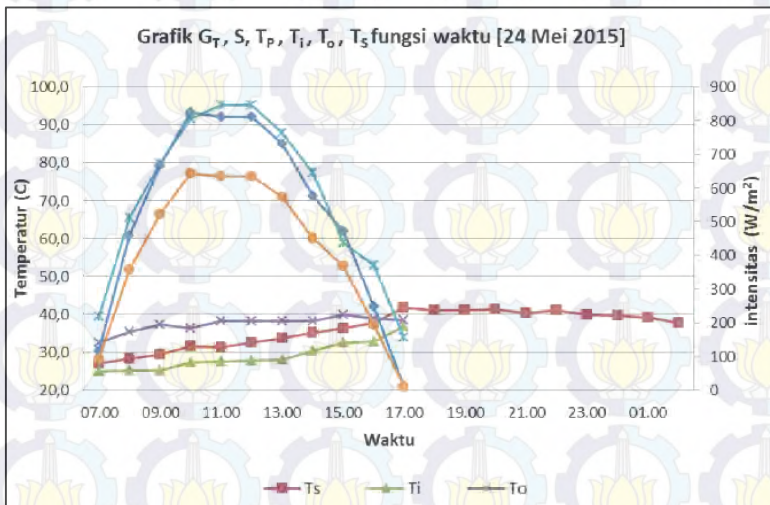
Gambar 4.3 Grafik G_T , S , T_p , T_i , T_o , T_s fungsi waktu pada tanggal 21 Mei 2015 tanpa penambahan massa batuan



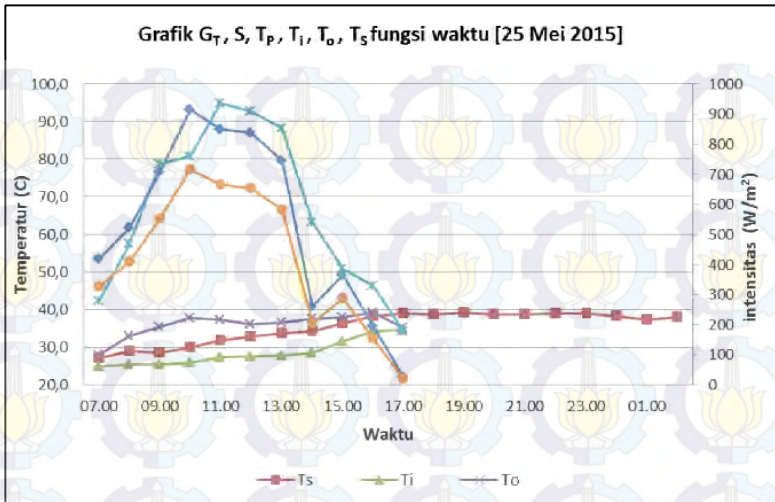
Gambar 4.4 Grafik G_T , S , T_p , T_i , T_o , T_s fungsi waktu pada tanggal 22 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 25 kg



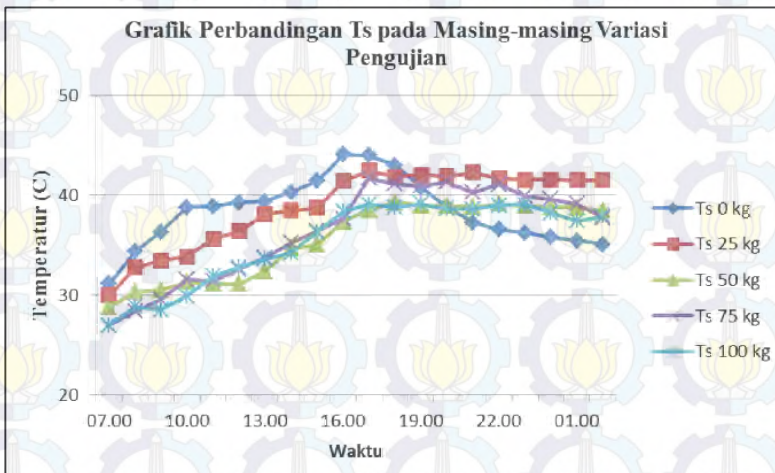
Gambar 4.5 Grafik G_T , S , T_p , T_i , T_o , T_s fungsi waktu pada tanggal 23 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 50 kg



Gambar 4.6 Grafik G_T , S , T_p , T_i , T_o , T_s fungsi waktu pada tanggal 24 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 75 kg



Gambar 4.7 Grafik G_T , S , T_p , T_i , T_o , T_s fungsi waktu pada tanggal 25 Mei 2015 dengan penambahan massa batuan sebesar 100 kg



Gambar 4.8 Grafik perbandingan Temperatur *Storage* pada masing-masing variasi pengujian

Pengujian dilakukan secara bertahap, pada pengujian pertama pada tanggal 21 Mei 2015 tidak menggunakan tambahan massa batu, pada tanggal 22 Mei 2015 menggunakan massa batu sebesar 25 kg, pada tanggal 23 Mei 2015 menggunakan massa batu tambahan sebesar 50 kg, dan pada tanggal 24 Mei 2015 menggunakan massa batu sebesar 75 kg, serta pada tanggal 25 Mei 2015 menggunakan massa batuan tambahan sebesar 100 kg.

Masing-masing grafik tersebut menunjukkan besarnya intensitas matahari (G_T) yang sampai pada permukaan bumi, energi yang terserap oleh absorber (S), temperatur pelat absorber (T_p), temperatur air masuk kolektor (T_i), temperatur keluar kolektor (T_o), dan temperatur air dalam tangki penyimpanan. Sumbu vertikal sebelah kanan pada grafik menunjukkan besarnya temperatur dalam satuan derajat celcius yang digunakan untuk indikator data temperatur (T) dalam grafik, sedangkan sisi kiri adalah daya persatuan luas (W/m^2) sebagai indikator dari intensitas matahari (G_T) dan energi terserap pelat absorber (S). Sumbu horizontal yang terdapat pada grafik menunjukkan waktu, dimana waktu tersebut merupakan titik waktu pengambilan data pada pengujian yang dilakukan. Pada tiap pengujian didapati trendline grafik yang hampir sama.

Dalam grafik tersebut, intensitas radiasi matahari menunjukkan kondisi yang tidak fluktuatif, dimana bentuk dari grafik membentuk kurva parabola. Bentuk tersebut didapat dari kondisi lingkungan dan posisi matahari. Apabila posisi matahari tegak lurus atau tepat horizontal maka intensitas matahari besar, seperti tampak pada sekitar jam 10.00 hingga 12.00 WIB. Pada pagi hari atau sore hari, nilai dari intensitas matahari yang terukur relatif lebih kecil dibanding saat siang hari. Terdapat perbedaan yang terlihat di kurva grafik G_T pada pengujian hari ke-lima. Pada kurva penurunan setelah mencapai titik puncak, terdapat kenaikan kembali intensitas matahari untuk beberapa saat yang kemudian dilanjutkan dengan penurunan kembali. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan kondisi lingkungan saat dilakukan

pengambilan data yang tidak dalam hari yang sama. Oleh karena itu intensitas matahari yang diterima juga bervariasi pada tiap pengambilan data.

Energi yang diserap (S) merupakan energi yang sampai pada permukaan pelat absorber setelah melewati kaca penutup. Profil dari grafik ini menyamai dengan grafik intensitas matahari. Hal tersebut terjadi karena energi yang diserap tergantung dari energi radiasi yang dipancarkan. Apabila intensitas radiasi matahari besar, maka energi yang mengenai pelat absorber juga besar, dan apabila intensitas radiasi matahari kecil, energi yang diserap juga cenderung lebih kecil.

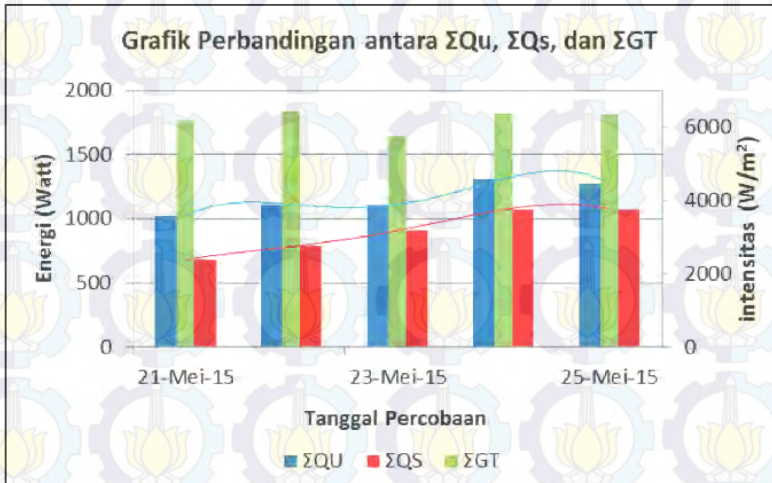
Pada grafik temperatur pelat (T_p), trendline berbentuk parabola. Hal ini menyerupai trendline dari grafik energi yang diserap (S) dan intensitas matahari (G_T). Hal ini terjadi karena energi radiasi yang diserap oleh pelat berupa energi termal. Oleh karena itu apabila energi yang diserap besar maka temperatur pelat juga tinggi begitu pula sebaliknya.

Trendline grafik dari temperatur inlet (T_i) dan temperatur air dalam tangki penyimpanan atau *storage* (T_s) berbentuk sama hingga ujung grafik temperatur inlet. Hal ini berhubungan karena air yang memasuki kolektor berasal dari air di dalam tangki, cenderung bagian bawahnya. Trendline grafik tersebut semakin lama semakin naik, dari jam 07.00 hingga jam 17.00 WIB. Sedangkan untuk temperatur air dalam tangki setelah tidak ada sinar matahari (setelah jam 17.00 WIB) cenderung semakin turun. Hal ini disebabkan karena adanya kehilangan panas dari tangki ke lingkungan sekitar yang memiliki temperatur lebih rendah. Pada pengujian tanpa menggunakan batu kerikil, penurunan temperatur dalam tangki terjadi secara signifikan relatif terhadap pengujian yang menggunakan batu kerikil. Pada pengujian yang menggunakan tambahan batu kerikil sebagai media tambahan penyimpan panas, trendlinenya cenderung melandai (17.00-02.00 WIB). Hal ini berarti losses yang terjadi dapat dikatakan cukup

kecil. Pada kelima grafik diatas, temperatur air dalam tangki yang terendah dimiliki oleh pengujian tanpa menggunakan tambahan batu kerikil. Grafik T_s pada pengujian dengan penambahan material penyimpan panas dari penambahan terkecil hingga terbesar seharusnya mempunyai trendline yang semakin melandai, namun dalam beberapa pengujian yang dilakukan terdapat ketidak sesuaian. Hal tersebut terjadi karena temperatur *storage* merupakan nilai rata-rata dari pengukuran temperatur bagian bawah dan bagian atas, sedangkan pengujian tidak meneliti tentang level stratifikasi pada tangki yang bisa menyebabkan ketidak aturan dalam pembagian perbedaan tingkat temperatur air pada tangki. Selain itu pada pengujian tidak memberi perlakuan pengadukan air dalam tangki, yang dapat membuat temperatur air dalam tangki bagian bawah dan atas bernilai sama, sehingga meminimalisir terjadinya perbedaan temperatur air yang berarti pada tangki bagian bawah dan atas.

Temperatur outlet (T_o) adalah temperatur air keluar dari kolektor. Air yang berasal dari tangki memasuki kolektor bertemperatur inlet (T_i) kemudian dipanaskan dalam kolektor dan selanjutnya keluar dengan temperatur outlet (T_o). Trendline dari grafik T_o bermacam-macam pada tiap pengujian. Dari kelima grafik tersebut cenderung tidak menentu. Terdapat grafik yang fluktuatif, ada yang naik kemudian turun kemudian naik lagi. Ada beberapa faktor yang berpengaruh pada grafik tersebut, diantaranya adalah temperatur inlet, kemudian energi yang diserap, dan juga losses yang terjadi.

4.4.2 Analisa grafik perbandingan antara ΣQ_u , ΣQ_s , dan ΣG_T



Gambar 4.9 Grafik perbandingan jumlah energi berguna, energi tersimpan, dan intensitas matahari

Grafik diatas menunjukkan jumlah dari energi yang berguna (ΣQ_u) dibanding dengan jumlah energi yang tersimpan dalam tangki penyimpanan (ΣQ_s) dan jumlah energi yang tersedia oleh radiasi matahari (ΣG_T). Sumbu vertikal sisi kiri menunjukkan bahwa jumlah energi dalam satuan watt, dan sisi kanan adalah jumlah energi radasi (ΣG_T) dalam satuan Watt/m² sedangkan sumbu yang horizontal merupakan tanggal pengujian dari alat penelitian. Dari kiri ke kanan menunjukkan bahwa perbedaan tanggal penelitian, hal ini merupakan perbedaan dari variasi masa batuan yang diberikan, dimana paling kiri yaitu pada tanggal 21 Mei 2015 merupakan pengujian dengan menggunakan massa batuan paling kecil (0 kg) dan ujung kanan adalah 25 Mei 2015 yang menggunakan 100 kg massa batuan. Dalam grafik tersebut jumlah energi yang tersedia (ΣG_T) jumlahnya bervariasi tiap harinya mulai dari paling kecil yaitu pada tanggal 23 Mei

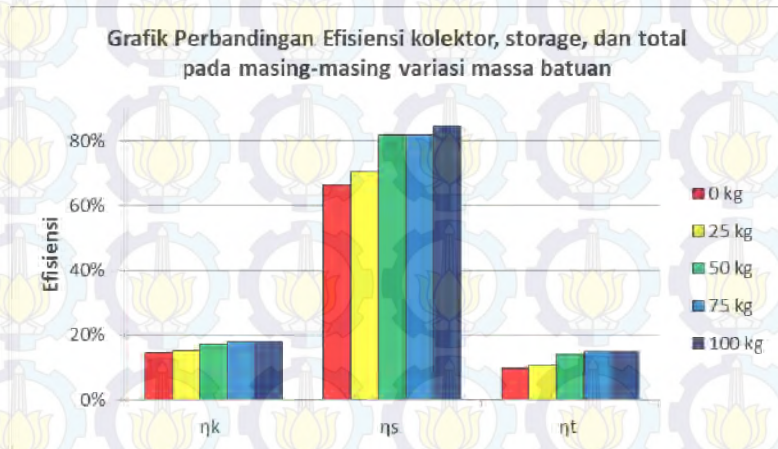
2015 sebesar 5757 W/m^2 dan tertinggi pada tanggal 22 Mei 2015 sebesar 6426 W/m^2 . Fluktuasi juga terjadi pada perhitungan jumlah energi berguna (ΣQ_u), terdapat ketidak samaan jumlah energi yang berguna, dimana terlihat paling kecil pada pengujian pertama dan tertinggi pada hari ke-empat. Berbeda dengan keduanya, energi yang disimpan (ΣQ_s) dari hari ke hari memiliki trendline hampir linier. Dari awal hingga akhir pengujian, terdapat kenaikan jumlah energi yang relatif signifikan, kecuali dari hari ke-empat menuju ke-lima yang memiliki sedikit kenaikan bila dibanding dengan lainnya.

Energi yang berguna (Q_u) merupakan energi radiasi matahari yang diterima oleh kolektor surya dan dimanfaatkan untuk memanaskan air dari temperatur rendah menjadi temperatur yang lebih tinggi. Energi yang tersimpan dalam tangki penyimpanan (Q_s) merupakan energi yang diterima dari proses pemanasan dan setelah mengalami loses dengan selang waktu tertentu. Energi yang tersedia (G_T) adalah energi yang berasal dari radiasi matahari yang nantinya dimanfaatkan menjadi energi berguna dan energi tersimpan.

Terlihat dalam grafik terdapat perbedaan jumlah energi antara energi tersedia (ΣG_T), diterima (ΣQ_u) dan tersimpan (ΣQ_s) pada tiap hari pengujian. Energi yang tersedia tidak seluruhnya dapat diserap oleh kolektor surya dan dimanfaatkan untuk memanaskan air. Hal ini terjadi akibat adanya loses atau kehilangan energi. Hal yang sama juga terjadi pada energi tersimpan. Energi hasil dari keluaran kolektor tidak sepenuhnya dapat disimpan oleh tangki penyimpanan. Apabila kehilangan energi yang berguna berasal dari kolektor, energi tersimpan kehilangan sejumlah energinya berasal dari faktor tangki penyimpanan itu sendiri. Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya energi berguna (Q_u) yaitu intensitas matahari yang diterima pelat absorber, luasan kolektor, faktor kehilangan panas dari pelat absorber, koefisien perpindahan panas total, dan temperatur lingkungan.

Secara kasat mata perbedaan paling besar terjadi pada hari pertama yaitu tanggal 21 Mei 2015, dimana loses yang terjadi cukup besar dibanding hari lainnya. Sedangkan loses paling kecil terjadi pada hari ke-tiga, meskipun tidak ada perbedaan yang cukup jauh bila dibanding dengan hari ke-empat dan ke-lima.

4.4.3 Analisa efisiensi



Gambar 4.10 Grafik perbandingan efisiensi kolektor, *storage*, dan total pada tiap variasi pengujian

Grafik diatas merupakan grafik efisiensi dari hasil pengujian. Pada grafik tersebut terlihat efisiensi dari kolektor (η_k), efisiensi penyimpanan atau *storage* (η_s), dan efisiensi total keseluruhan alat (η_t) pada masing-masing variasi massa batuan yang ditambahkan kedalam tangki. Pada sumbu vertikal mengindikasikan mengenai besarnya efisiensi, sedangkan sumbu horizontal dari kiri ke kanan merupakan efisiensi dari kolektor (η_k), penyimpanan (η_s), dan total (η_t). Untuk masing-masing efisiensi dari kiri ke kanan merupakan jumlah masa batuan yang ditambahkan dimana paling kiri sebesar 0 kg dan paling kanan

sebesar 100 kg. Terlihat dari grafik pada efisiensi kolektor tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan berkisar antara 15% hingga 18%. Perbedaan yang cukup signifikan terjadi pada efisiensi penyimpanan dimana kisaran harga efisiensi sekitar 66% hingga 84%. Hal yang hampir serupa seperti efisiensi kolektor terjadi pada efisiensi total dimana rentang harga efisiensinya sekitar 10% hingga 15%. Efisiensi paling kecil terlihat pada pengujian hari pertama yang tidak memakai tambahan massa batu, dan tertinggi pada pengujian hari terakhir yaitu tanggal 25 Mei 2015.

Terlihat pada grafik efisiensi kolektor (η_k) tidak memiliki nilai yang signifikan dimana perbedaan efisiensi kolektor yang ditunjukkan paling besar hanya pada nilai 3% untuk lima kali pengujian. Jumlah energi radiasi yang tersedia dan yang diterima kemudian dimanfaatkan tidak terdapat perbedaan yang sangat berarti. Oleh karena itu perbedaan dari efisiensi kolektor tidak cukup terlihat.

Pada efisiensi penyimpanan (η_s), dari kiri ke kanan efisiensinya memiliki nilai yaitu 66%, 70%, 82%, 82%, dan 84%. Disini terdapat perbedaan yang cukup besar yang mencapai 18%. Nilai efisiensi tertinggi dimiliki tangki penyimpanan yang mempunyai tambahan massa batu sebesar 100 kg. Pada pengujian pertama ke pengujian ke-dua memiliki perbedaan sebesar 4%, kedua hingga ke-tiga sebesar 12%, ke-tiga hingga ke-empat tidak lebih dari 1%, dan ke-empat hingga ke-lima hanya sebesar 2% saja. Nilai efisiensi penyimpanan ketika pada penambahan massa batuan 50 kg dan 75 kg hampir sama dikarenakan beberapa faktor, yaitu jumlah intensitas matahari (ΣG_T), energi berguna (ΣQ_U), dan energi tersimpan (ΣQ_S) yang memiliki nilai hampir

sama juga pada keduanya. Perbedaan yang bernilai kecil tersebut tidak sampai memberikan perbedaan efisiensi penyimpanan, karena efisiensi penyimpanan dipengaruhi oleh ketiga hal tersebut. Apabila dilihat dari selisih perbedaan efisiensi tersebut, dengan penambahan massa batu yang sama efisiensi terbaik dapat dikatakan bahwa tangki penyimpanan yang memiliki 50 kg massa batu di dalamnya. Dengan penambahan massa batu yang sama penambahan efisiensi dari tangki penyimpanan tidak menunjukkan hasil yang linier.

Efisiensi total (η_t) merupakan perkalian antara efisiensi kolektor dengan efisiensi tangki penyimpanan (*storage*). Dalam grafik tampak perbedaan efisiensi tiap variasi yang menunjukkan hasil cukup mendekati nilai antara satu sama lain. Pada pengujian ke-satu hingga empat memiliki perbedaan yang tampak, tetapi pada pengujian ke-empat hingga ke-lima tidak terlihat perbedaan. Hal ini terjadi karena hasil perkalian efisiensi kolektor dan penyimpanan memiliki nilai yang sama.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan eksperimen pada pemanas air tenaga surya dengan tambahan massa batuan pada tangki penyimpanan sebesar 0 kg, 25 kg, 50 kg, 75 kg, dan 100 kg, kemudian dilakukan analisa pada data yang didapat. Selanjutnya dari analisa yang dilakukan, dapat dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari perhitungan yang telah dilakukan, didapat performansi dari *solar water heater*. Efisiensi kolektor (η_k), *storage* (η_s), dan total (η_t) bernilai berbeda pada tiap variasi. Efisiensi tersebut disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 5.1 Efisiensi dari kolektor surya, *storage*, dan total pada tiap variasi penambahan massa batuan

Penambahan Massa batuan	Efisiensi		
	η_k	η_s	η_t
0 kg	15%	66%	10%
25 kg	15%	70%	11%
50 kg	17%	82%	14%
75 kg	18%	82%	15%
100 kg	18%	84%	15%

2. Faktor kehilangan panas mempengaruhi hasil performansi pemanas air tenaga surya. Performansi berbanding terbalik dengan besarnya loses yang terjadi. Semakin besar loses, maka performansi semakin mengecil. Dalam perancangan pemanas air tenaga surya sebaiknya meminimalisir loses yang akan terjadi.

3. Efisiensi *storage* yang paling besar yang didapat sebesar 84% yaitu dengan penambahan massa batuan sebesar 100 kg. Penambahan massa batuan yang paling efektif pada penelitian kali ini adalah sebesar 50 kg, karena kenaikan efisiensi dari *storage* relatif lebih besar dari pada pengujian yang lain. Penambahan efisiensi terbesar yaitu 12% dari massa batuan 25 kg menuju 50 kg. Dengan penambahan massa batu yang sama tidak berarti akan menambah efisiensi secara linier.
4. Penggunaan tangki penyimpanan paling efektif yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu dengan rasio antara massa batu dengan massa air sebesar 1:3.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah penulis lakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan demi menunjang pengembangan teknologi dalam negeri, khususnya dalam sektor energi. Saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perlu studi eksperimen lanjut dengan mengubah variasi jenis batuan. Penulis menggunakan jenis batuan yang umum dijumpai di lingkungan sekitar yaitu *limestone* atau yang disebut batu koral. Adapun yang dapat dikaji lagi adalah menggunakan jenis PCM (*phase change material*) yang dapat mempengaruhi performansi dari penyimpanan pemanas air tenaga surya. Tetapi perlu dipertimbangkan juga penggunaannya.
2. Variasi dalam massa atau volume dari air dalam tangki penyimpanan dapat dipertimbangkan dalam studi kedepannya. Tetapi perlu dipertimbangkan juga kebutuhan air yang akan digunakan.
3. Penggunaan alat ukur yang dapat mengukur data tiap waktu dan mencatat sekaligus dapat dipertimbangkan, supaya pengukuran data lebih akurat, misalnya menggunakan *data logger* yang dapat merekam data tiap menitnya.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Plumbing Engineers . 2003. **Domestic Water Heating Design Manual 2nd Edition**. United States of America: American Society of Plumbing Engineers.

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2014. **Outlook Energi Indonesia 2014**. Jakarta: Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi.

Bergman, Theodore L., Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, dan David P. Dewitt. 2011. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer Seventh Edition**. United States of America: John Wiley & Sons Ltd.

Dincer, Ibrahim, dan Rosen Marc A. 2011. **Thermal Energy Storage System and Applications Second Edition**. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Duffie, John A., dan William A. Beckman. 1980. **Solar Engineering of Thermal Processes**. United States of America: John Wiley & Sons Ltd.

Garg, H. P., S. C. Mullick, dan A. K. Bhargava. 1985. **Solar Thermal Energy Storage**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

Laughton, Cris. 2010. **Solar Domestic Water Heater, The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation**. London: Earthscan.

Raithby, G. D., dan K. G. T. Hollands. 1998. **Handbook of Heat Transfer Fundamentals**. New York: McGraw-Hill.



LAMPIRAN

LAMPIRAN A DATA PENELITIAN

Tabel A.1 Data penelitian pemanas air tenaga surya tanpa penambahan massa batuan pada tanggal pengujian 21 Mei 2015.

Tabel A.2 Data penelitian pemanas air tenaga surya dengan penambahan massa batuan sebesar 25 kg dalam tangki penyimpanan pada tanggal pengujian 22 Mei 2015.

Tabel A.3 Data penelitian pemanas air tenaga surya dengan penambahan massa batuan sebesar 50 kg dalam tangki penyimpanan pada tanggal pengujian 23 Mei 2015.

Tabel A.4 Data penelitian pemanas air tenaga surya dengan penambahan massa batuan sebesar 75 kg dalam tangki penyimpanan pada tanggal pengujian 24 Mei 2015.

Tabel A.5 Data penelitian pemanas air tenaga surya dengan penambahan massa batuan sebesar 100 kg dalam tangki penyimpanan pada tanggal pengujian 25 Mei 2015.

LAMPIRAN B-1 DATA PERHITUNGAN BAGIAN KOLEKTOR

Tabel B-1.1 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 0 kg.

Tabel B-1.2 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 25 kg.

Tabel B-1.3 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 50 kg.

Tabel B-1.4 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 75 kg.

Tabel B-1.5 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 100 kg.

LAMPIRAN B-2 DATA PERHITUNGAN BAGIAN STORAGE

Tabel B-2.1 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 0 kg.

Tabel B-2.2 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 25 kg.

Tabel B-2.3 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 50 kg.

Tabel B-2.4 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 75 kg.

Tabel B-2.5 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 100 kg.

LAMPIRAN B-3 DATA PERHITUNGAN EFISIENSI

Tabel B-3.1 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 0 kg.

Tabel B-3.2 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 25 kg.

Tabel B-3.3 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 50 kg.

Tabel B-3.4 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 75 kg.

Tabel B-3.5 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 100 kg.

LAMPIRAN C

- Tabel C.1 Urutan nomor hari dalam satu tahun.
Tabel C.2 Properties dari solid metal.
Tabel C.3 Properties dari material insulasi.
Tabel C.4 Properties air jenuh dan udara pada satu atm.
Tabel C.5 properties dari material bangunan.
Tabel C.6 properties material lainnya
Tabel C.7 properties radiasi surya pada beberapa material

[illegible][illegible][illegible]

Lampiran B-1 Data Perhitungan Bagian Kolektor

Tabel B-1.1 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 0 kg

No	Waktu	G _r	S	T _a	T _{slp}	T _c	T _p	T _{mp-c}	ρ	α	μ	k	Pr	Ra	Nu
1	07.00	275	215	301	288	303	322	313	1,12	2,4E-05	1,9E-05	0,03	0,705	175117	5,53
2	08.00	431	337	305	293	315	347	331	1,06	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,703	226859	5,82
3	09.00	627	491	306	295	325	361	343	1,02	2,9E-05	2,0E-05	0,03	0,701	221663	5,79
4	10.00	745	583	308	298	332	370	351	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	207848	5,72
5	11.00	784	613	310	301	331	372	351	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	221334	5,79
6	12.00	824	644	310	301	332	371	352	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	213464	5,75
7	13.00	745	583	311	302	326	365	346	1,01	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,701	232994	5,85
8	14.00	601	470	308	298	324	355	339	1,03	2,8E-05	2,0E-05	0,03	0,701	202079	5,69
9	15.00	405	317	307	297	314	338	326	1,07	2,6E-05	2,0E-05	0,03	0,703	186400	5,60
10	16.00	196	153	306	295	307	322	315	1,11	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,705	138187	5,29
11	17.00	13,1	10,2	304	292	299	308	304	1,15	2,3E-05	1,9E-05	0,03	0,706	100492	5,00

No	Waktu	ΔT _{c-a}	T _{f-a}	p	α	μ	k	Pr	L	Re _L	Gr	Ra _L	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw
1	07.00	2,3	29,2	1,169	2,25E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	0	3,0E+08	2,1E+08	0,00	free	89
2	08.00	10,8	36,9	1,139	2,36E-05	1,89E-05	0,027	0,70	1	6038	1,3E+09	8,8E+08	34,3	free	144
3	09.00	19,6	42,3	1,118	2,43E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	5853	2,1E+09	1,5E+09	61,1	free	170
4	10.00	24,1	47,0	1,100	2,50E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	17083	2,4E+09	1,7E+09	8,20	free	178
5	11.00	21,8	47,4	1,099	2,50E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	125005	2,2E+09	1,5E+09	0,14	forced	-
6	12.00	22,3	48,2	1,096	2,51E-05	1,94E-05	0,028	0,70	1	147088	2,2E+09	1,5E+09	0,10	forced	-
7	13.00	15,4	45,2	1,107	2,47E-05	1,92E-05	0,028	0,70	1	115095	1,6E+09	1,1E+09	0,12	forced	-
8	14.00	15,8	42,9	1,116	2,44E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	75826	1,7E+09	1,2E+09	0,23	forced	-
9	15.00	7,3	37,7	1,136	2,37E-05	1,89E-05	0,027	0,70	1	60121	8,4E+08	5,9E+08	0,29	forced	-
10	16.00	1,7	33,3	1,153	2,31E-05	1,87E-05	0,027	0,70	1	73968	2,0E+08	1,4E+08	0,04	forced	-
11	17.00	4,5	28,3	1,172	2,24E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	25383	5,9E+08	4,1E+08	0,91	forced	-

No	Waktu	Tm	p	a	μ	k	Pr	Ra	Nu	h	W	D	k_b	b	Y	C_{bond}	k_p	m	F	F'
1	07.00	304	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,55	5E+05	6,95	374	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,54	0,90	0,399
2	08.00	310	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,75	4E+06	11,35	621	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,10	0,89	0,259
3	09.00	311	996	1,50E-07	7E-04	0,63	4,57	4E+06	11,47	629	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,41	0,88	0,240
4	10.00	312	995	1,50E-07	7E-04	0,63	4,52	4E+06	11,41	626	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,58	0,88	0,233
5	11.00	312	995	1,51E-07	7E-04	0,63	4,48	4E+06	10,91	600	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,52	0,85	0,200
6	12.00	311	995	1,50E-07	7E-04	0,63	4,55	3E+06	10,39	570	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,62	0,85	0,204
7	13.00	312	995	1,51E-07	7E-04	0,63	4,51	3E+06	10,54	579	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,37	0,85	0,212
8	14.00	312	995	1,51E-07	7E-04	0,63	4,43	3E+06	10,63	585	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,00	0,86	0,226
9	15.00	313	995	1,51E-07	7E-04	0,63	4,37	3E+06	10,14	558	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,63	0,87	0,250
10	16.00	314	995	1,51E-07	6E-04	0,63	4,21	3E+06	10,27	567	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,49	0,88	0,255
11	17.00	312	995	1,51E-07	7E-04	0,63	4,42	4E+05	6,44	354	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,81	0,90	0,392

No	Waktu	h_w	h_{re-a}	h_{p-c}	h_{p-e}	U_t	U_b	U_L	Tmr	Cp	m	Fr	Q_u
1	07.00	2,35	5,29	6,13	3,01	4,16	0,8	4,96	31	4180	0,011	0,4	89,7
2	08.00	3,87	5,76	7,28	3,33	5,05	0,8	5,85	37	4179	0,002	0,2	88,3
3	09.00	4,66	6,09	8,12	3,42	5,57	0,8	6,37	38	4178	0,002	0,2	122,4
4	10.00	4,93	6,41	8,68	3,44	5,86	0,8	6,66	39	4178	0,003	0,2	146,0
5	11.00	13,80	6,45	8,73	3,49	7,62	0,8	8,42	39	4178	0,003	0,2	133,3
6	12.00	15,26	6,51	8,76	3,47	7,83	0,8	8,63	38	4178	0,004	0,2	145,0
7	13.00	13,04	6,33	8,29	3,47	7,32	0,8	8,12	39	4178	0,003	0,2	136,2
8	14.00	10,07	6,16	7,86	3,32	6,62	0,8	7,42	39	4178	0,003	0,2	110,8
9	15.00	8,60	5,83	6,98	3,16	5,96	0,8	6,76	40	4178	0,002	0,2	78,1
10	16.00	9,59	5,57	6,25	2,90	5,71	0,8	6,51	41	4178	0,001	0,2	27,4
11	17.00	4,96	5,26	5,61	2,66	4,57	0,8	5,37	39	4178	-0,0033	0,4	-16,6

Tabel B-1.2 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 25 kg

No	Waktu	Gr	S	Ta	T _{sky}	Tc	Tp	Tmp-c	ρ	α	μ	k	Pr	Ra	Nu
1	07.00	275	215	302	290	309	327	318	1,10	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,704	163677	5,46
2	08.00	484	378	305	294	316	347	331	1,06	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,703	224206	5,80
3	09.00	627	491	310	301	325	360	343	1,02	2,9E-05	2,0E-05	0,03	0,701	214183	5,75
4	10.00	784	613	311	302	333	369	351	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	199573	5,67
5	11.00	824	644	310	301	330	369	350	1,00	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	216110	5,76
6	12.00	824	644	310	301	330	370	350	1,00	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	224635	5,81
7	13.00	758	593	311	302	328	363	346	1,01	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,701	208934	5,73
8	14.00	627	491	309	300	318	354	336	1,04	2,8E-05	2,0E-05	0,03	0,702	245127	5,91
9	15.00	431	337	310	301	317	338	327	1,07	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,703	159913	5,44
10	16.00	209	164	308	298	308	321	314	1,11	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,705	120064	5,16
11	17.00	13,1	10,2	304	293	300	307	303	1,15	2,3E-05	1,9E-05	0,03	0,707	72494	4,72

No	Waktu	ΔT _{c-a}	T _{f-c-a}	ρ	α	μ	k	Pr	L	Re _L	Gr	Ra _L	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw
1	07.00	6,7	32,3	1,1565	2,29E-05	1,87E-05	0,027	0,70	1	0	8,2E+08	5,8E+08	0	free	125
2	08.00	10,6	37,3	1,1373	2,36E-05	1,89E-05	0,027	0,70	1	6024	1,2E+09	8,6E+08	33,6	free	142
3	09.00	15,2	44,6	1,1092	2,46E-05	1,92E-05	0,028	0,70	1	11550	1,6E+09	1,1E+09	11,8	free	155
4	10.00	22,2	48,6	1,0939	2,52E-05	1,94E-05	0,028	0,70	1	5642	2,2E+09	1,5E+09	67,7	free	172
5	11.00	20,3	47,2	1,0994	2,50E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	5690	2,0E+09	1,4E+09	62,3	free	168
6	12.00	20,3	46,7	1,1013	2,49E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	51358	2,0E+09	1,4E+09	0,77	forced	-
7	13.00	17,6	46,3	1,1027	2,49E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	154387	1,8E+09	1,2E+09	0,07	forced	-
8	14.00	8,8	40,4	1,1255	2,41E-05	1,90E-05	0,027	0,70	1	147947	9,6E+08	6,8E+08	0,04	forced	-
9	15.00	7,2	40,1	1,1267	2,40E-05	1,90E-05	0,027	0,70	1	5929	7,9E+08	5,5E+08	22,5	free	123
10	16.00	0,4	34,8	1,1471	2,33E-05	1,88E-05	0,027	0,70	1	36677	5,2E+07	3,6E+07	0,04	forced	-
11	17.00	4,1	29,0	1,1695	2,25E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	50562	5,3E+08	3,7E+08	0,21	forced	-

No	Waktu	Tm	p	α	μ	k	Pr	Ra	Nu	h	W	D	k_b	b	γ	C_{bond}	k_p	m	F	F'
1	07.00	303	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,71	1E+06	8,27	444	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	6,80	0,90	0,343
2	08.00	309	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,94	4E+06	11,52	716	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,10	0,89	0,233
3	09.00	308	997	1,49E-07	7E-04	0,62	5,01	4E+06	11,05	685	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,37	0,88	0,228
4	10.00	309	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,84	4E+06	11,00	685	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,57	0,88	0,218
5	11.00	310	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,76	4E+06	10,99	685	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,53	0,88	0,220
6	12.00	309	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,92	3E+06	10,26	637	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,98	0,86	0,212
7	13.00	309	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,92	2E+06	9,86	612	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	8,53	0,85	0,197
8	14.00	310	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,78	3E+06	9,99	623	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	8,32	0,85	0,202
9	15.00	311	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,62	2E+06	9,29	580	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	6,98	0,89	0,278
10	16.00	312	995	1,51E-07	7E-04	0,63	4,49	2E+06	9,82	615	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,17	0,89	0,257
11	17.00	310	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,71	4E+05	6,49	405	0,19	0,01	429	0,32	0,001	137280	116	7,05	0,89	0,347

No	Waktu	h_w	h_{re-a}	h_{rp-c}	h_{p-c}	U_t	U_b	U_L	Tmr	Cp	m	F _R	Q _u
1	07.00	3,33	5,47	6,46	3,02	4,56	0,8	5,36	30	4180	0,0044	0,325	81,2
2	08.00	3,84	5,79	7,30	3,32	5,05	0,8	5,85	36	4179	0,0015	0,206	93,3
3	09.00	4,26	6,28	8,08	3,39	5,49	0,8	6,29	35	4179	0,0024	0,210	128,6
4	10.00	4,78	6,54	8,67	3,41	5,85	0,8	6,65	36	4179	0,0029	0,204	152,5
5	11.00	4,66	6,44	8,59	3,45	5,78	0,8	6,58	37	4179	0,0031	0,207	159,5
6	12.00	8,07	6,41	8,62	3,48	6,59	0,8	7,39	36	4179	0,0039	0,201	154,9
7	13.00	15,61	6,40	8,31	3,40	7,64	0,8	8,44	36	4179	0,0039	0,186	134,4
8	14.00	14,90	6,02	7,62	3,42	7,23	0,8	8,03	37	4179	0,0031	0,189	110,1
9	15.00	3,35	6,00	7,03	3,08	4,86	0,8	5,66	38	4178	0,0040	0,263	102,8
10	16.00	6,33	5,68	6,22	2,82	5,16	0,8	5,96	39	4178	0,0013	0,219	40,2
11	17.00	7,52	5,31	5,60	2,51	4,97	0,8	5,77	37	4179	-0,0018	0,403	-10,0

Tabel B-1.3 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 50 kg

No	Waktu	G _r	S	T _a	T _{sky}	T _c	T _p	T _{mp-c}	ρ	α	μ	k	Pr	Ra	Nu
1	07.00	118	92	302	289	301	311	306	1,14	2,3E-05	1,9E-05	0,03	0,706	100999	5,00
2	08.00	497	388	310	301	320	344	332	1,05	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,703	177572	5,55
3	09.00	523	409	309	300	319	345	332	1,05	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,702	185969	5,60
4	10.00	758	593	309	299	329	366	347	1,00	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	213317	5,75
5	11.00	797	624	309	299	331	366	348	1,00	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	203874	5,70
6	12.00	797	624	309	299	333	368	351	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	193458	5,64
7	13.00	719	562	309	300	328	359	343	1,02	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,701	190270	5,62
8	14.00	444	348	307	297	319	342	330	1,06	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,703	169784	5,50
9	15.00	301	235	307	296	313	331	322	1,09	2,6E-05	2,0E-05	0,03	0,704	145465	5,35
10	16.00	209	164	304	292	308	320	314	1,11	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,705	110026	5,08
11	17.00	26,1	20,4	303	291	300	307	303	1,15	2,3E-05	1,9E-05	0,03	0,707	74325	4,74

No	Waktu	ΔT _{c-a}	T _{fc-a}	ρ	α	μ	k	Pr	L	Re _L	Gr	Ra _L	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw	
1	07.00	0,6	28,2	1,1725	2,23E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	0	8,3E+07	5,9E+07	0	free	58	1,53
2	08.00	10,1	41,6	1,1210	2,42E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	5878	1,1E+09	7,6E+08	31,6	free	137	3,75
3	09.00	10,3	41,2	1,1225	2,42E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	5892	1,1E+09	7,8E+08	32,3	free	138	3,77
4	10.00	20,5	45,8	1,1048	2,48E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	45891	2,1E+09	1,4E+09	0,99	forced	-	7,52
5	11.00	22,0	46,5	1,1019	2,49E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	62825	2,2E+09	1,5E+09	0,56	forced	-	9,11
6	12.00	24,7	47,9	1,0968	2,51E-05	1,94E-05	0,028	0,70	1	124677	2,4E+09	1,7E+09	0,16	forced	-	13,80
7	13.00	18,9	45,5	1,1060	2,48E-05	1,92E-05	0,028	0,70	1	80457	1,9E+09	1,3E+09	0,30	forced	-	10,52
8	14.00	11,7	39,9	1,1276	2,40E-05	1,90E-05	0,027	0,70	1	5937	1,3E+09	9,1E+08	36,7	free	145	3,95
9	15.00	6,9	37,0	1,1387	2,36E-05	1,89E-05	0,027	0,70	1	54328	8,0E+08	5,6E+08	0,27	forced	-	8,07
10	16.00	4,7	32,9	1,1545	2,30E-05	1,87E-05	0,027	0,70	1	86536	5,8E+08	4,1E+08	0,08	forced	-	10,52
11	17.00	3,2	28,4	1,1716	2,24E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	107784	4,1E+08	2,9E+08	0,04	forced	-	11,82

No	Waktu	Tm	p	α	μ	k	Pr	Ra	Nu	h	W	D	k_b	b	γ	C_{bond}	k_p	m	F	F'
1	07.00	301	999	1,46E-07	9E-04	0,61	5,91	2E+06	9,07	485	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,26	0,91	0,362
2	08.00	304	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,55	3E+06	10,23	551	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,12	0,89	0,280
3	09.00	305	998	1,48E-07	8E-04	0,62	5,46	3E+06	10,51	567	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,13	0,89	0,274
4	10.00	306	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,24	4E+06	11,28	611	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,87	0,87	0,224
5	11.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,39	3E+06	10,78	583	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,06	0,86	0,224
6	12.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,36	3E+06	10,42	563	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,49	0,85	0,211
7	13.00	306	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,28	3E+06	10,56	572	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,11	0,86	0,225
8	14.00	307	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,18	3E+06	10,47	568	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,11	0,89	0,275
9	15.00	308	997	1,49E-07	7E-04	0,62	5,02	3E+06	10,03	545	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,49	0,88	0,262
10	16.00	309	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,90	2E+06	9,58	522	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,52	0,88	0,268
11	17.00	308	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,98	9E+05	7,73	421	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,37	0,88	0,319

No	Waktu	h_w	h_{re-a}	h_{rp-c}	h_{p-c}	U_t	U_b	U_L	Tmr	Cp	m	Fr	Q_u
1	07.00	1,53	5,24	5,73	2,67	3,75	0,8	4,55	28	4180	0,001	0,3	37,5
2	08.00	3,75	6,09	7,35	3,18	5,09	0,8	5,89	31	4180	0,003	0,3	132,3
3	09.00	3,77	6,06	7,38	3,21	5,10	0,8	5,90	32	4180	0,003	0,3	133,6
4	10.00	7,52	6,34	8,44	3,43	6,39	0,8	7,19	33	4179	0,003	0,2	152,8
5	11.00	9,11	6,38	8,50	3,40	6,73	0,8	7,53	32	4180	0,003	0,2	162,8
6	12.00	13,80	6,47	8,67	3,39	7,56	0,8	8,36	32	4180	0,003	0,2	154,2
7	13.00	10,52	6,32	8,14	3,32	6,82	0,8	7,62	33	4179	0,003	0,2	147,7
8	14.00	3,95	5,96	7,24	3,14	5,07	0,8	5,87	34	4179	0,002	0,3	107,6
9	15.00	8,07	5,79	6,72	2,99	5,71	0,8	6,51	35	4179	0,002	0,2	66,1
10	16.00	10,52	5,52	6,22	2,78	5,77	0,8	6,57	36	4179	0,001	0,2	38,3
11	17.00	11,82	5,27	5,60	2,52	5,50	0,8	6,30	35	4179	-0,0003	1,0	-3,4

Tabel B-1.4 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 75 kg

No	Waktu	Gr	S	Ta	T _{sky}	Tc	Tip	Tmp-c	ρ	α	μ	k	Pr	Ra	Nu
1	07.00	118	92	303	291	302	312	307	1,14	2,4E-05	1,9E-05	0,03	0,706	108372	5,07
2	08.00	458	358	307	297	315	338	327	1,07	2,6E-05	2,0E-05	0,03	0,703	180206	5,56
3	09.00	667	521	307	297	322	353	337	1,04	2,8E-05	2,0E-05	0,03	0,702	203193	5,69
4	10.00	824	644	308	298	329	365	347	1,01	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,700	208187	5,72
5	11.00	810	634	309	299	335	368	351	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	183255	5,58
6	12.00	810	634	309	300	332	368	350	0,99	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	199017	5,67
7	13.00	732	572	309	300	329	361	345	1,01	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,701	188346	5,61
8	14.00	575	450	309	299	322	350	336	1,04	2,8E-05	2,0E-05	0,03	0,702	188765	5,61
9	15.00	471	368	307	297	314	332	323	1,09	2,6E-05	2,0E-05	0,03	0,704	147692	5,36
10	16.00	248	194	305	294	310	326	318	1,10	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,704	139538	5,30
11	17.00	13,1	10,2	303	291	298	307	302	1,15	2,3E-05	1,9E-05	0,03	0,707	98037	4,98

No	Waktu	ΔT _{c-a}	Tf _{c-a}	ρ	α	μ	k	Pr	L	Re _L	Gr	Ra _L	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw
1	07.00	1,1	29,4	1,1677	2,25E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	0	1,5E+08	1,0E+08	0	free	70
2	08.00	8,1	38,0	1,1346	2,37E-05	1,89E-05	0,027	0,70	1	0	9,2E+08	6,4E+08	0	free	129
3	09.00	15,2	41,6	1,1209	2,42E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	5877	1,6E+09	1,1E+09	47,3	free	157
4	10.00	21,0	45,5	1,1058	2,48E-05	1,92E-05	0,028	0,70	1	17234	2,1E+09	1,5E+09	7,20	free	171
5	11.00	26,3	48,6	1,0938	2,52E-05	1,94E-05	0,028	0,70	1	5641	2,5E+09	1,8E+09	80,1	free	182
6	12.00	23,4	47,7	1,0973	2,51E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	39701	2,3E+09	1,6E+09	1,46	free	176
7	13.00	20,3	46,1	1,1034	2,49E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	85862	2,0E+09	1,4E+09	0,28	forced	-
8	14.00	13,8	42,4	1,1178	2,43E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	70196	1,5E+09	1,0E+09	0,30	forced	-
9	15.00	6,7	37,4	1,1371	2,36E-05	1,89E-05	0,027	0,70	1	60225	7,7E+08	5,4E+08	0,21	forced	-
10	16.00	5,0	34,5	1,1481	2,32E-05	1,88E-05	0,027	0,70	1	6122	6,0E+08	4,2E+08	16,1	free	113
11	17.00	5,0	27,5	1,1752	2,22E-05	1,84E-05	0,026	0,71	1	6374	6,7E+08	4,7E+08	16,4	free	117

No	Waktu	Tm	p	α	μ	k	Pr	Ra	Nu	h	W	D	k _b	b	γ	C _{bond}	k _p	m	F	F'
1	07.00	302	998	1,47E-07	9E-04	0,61	5,84	2E+06	9,41	504	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,36	0,91	0,346
2	08.00	303	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,65	3E+06	10,20	549	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,99	0,89	0,288
3	09.00	304	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,52	3E+06	10,70	576	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,28	0,88	0,263
4	10.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,44	2E+06	9,92	536	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,49	0,88	0,265
5	11.00	306	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,30	3E+06	10,38	562	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,61	0,87	0,251
6	12.00	306	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,28	3E+06	10,34	560	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,57	0,88	0,253
7	13.00	306	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,27	3E+06	10,32	559	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,17	0,86	0,226
8	14.00	307	997	1,49E-07	8E-04	0,62	5,09	2E+06	9,68	526	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,90	0,87	0,248
9	15.00	309	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,86	2E+06	9,62	525	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,55	0,88	0,266
10	16.00	309	996	1,49E-07	7E-04	0,62	4,89	2E+06	9,20	502	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,76	0,90	0,320
11	17.00	311	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,66	5E+05	6,96	381	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,51	0,90	0,397

No	Waktu	h _w	h _{re-a}	h _{rp-c}	h _{p-c}	U _t	U _b	U _L	Tmr	Cp	ṁ	F _R	Q _u
1	07.00	1,86	5,32	5,82	2,72	3,90	0,8	4,70	29	4180	0,001	0,3	37,6
2	08.00	3,50	5,85	7,01	3,15	4,87	0,8	5,67	30	4180	0,003	0,3	122,6
3	09.00	4,28	6,06	7,73	3,31	5,34	0,8	6,14	31	4180	0,003	0,2	159,0
4	10.00	4,73	6,32	8,39	3,41	5,71	0,8	6,51	32	4180	0,005	0,3	198,3
5	11.00	5,06	6,52	8,73	3,36	5,91	0,8	6,71	33	4179	0,004	0,2	183,5
6	12.00	4,88	6,47	8,64	3,41	5,84	0,8	6,64	33	4179	0,004	0,2	186,0
7	13.00	10,97	6,37	8,25	3,33	6,94	0,8	7,74	33	4179	0,004	0,2	150,9
8	14.00	9,59	6,13	7,64	3,25	6,44	0,8	7,24	34	4179	0,004	0,2	127,7
9	15.00	8,60	5,81	6,75	3,00	5,82	0,8	6,62	36	4179	0,003	0,2	105,7
10	16.00	3,02	5,63	6,46	2,93	4,50	0,8	5,30	36	4179	0,002	0,3	62,4
11	17.00	3,07	5,22	5,55	2,64	4,12	0,8	4,92	38	4178	-0,002	0,5	-12,0

Tabel B-1.5 Perhitungan data penelitian bagian kolektor dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 100 kg

No	Waktu	Gr	S	Ta	T _{sky}	Tc	Thp-c	ρ	α	μ	k	Pr	Ra	Nu	hw
1	07.00	418	327	304	292	303	315	1,13	2,4E-05	1,9E-05	0,03	0,706	118524	5,15	
2	08.00	523	409	304	292	310	331	1,09	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,704	174596	5,53	
3	09.00	706	552	309	300	318	352	1,05	2,8E-05	2,0E-05	0,03	0,702	233019	5,85	
4	10.00	915	716	306	295	325	354	1,03	2,8E-05	2,0E-05	0,03	0,701	188723	5,61	
5	11.00	850	664	309	300	331	368	1,00	3,0E-05	2,1E-05	0,03	0,700	211369	5,74	
6	12.00	837	654	308	298	327	366	1,01	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,701	227926	5,82	
7	13.00	745	583	309	300	325	361	1,02	2,9E-05	2,1E-05	0,03	0,701	220644	5,79	
8	14.00	261	204	307	296	321	336	1,07	2,7E-05	2,0E-05	0,03	0,703	117428	5,14	
9	15.00	366	286	306	295	309	324	1,11	2,5E-05	1,9E-05	0,03	0,705	131818	5,25	
10	16.00	196	153	304	293	307	319	1,12	2,4E-05	1,9E-05	0,03	0,705	120137	5,16	
11	17.00	26,1	20,4	304	292	301	307	1,15	2,3E-05	1,9E-05	0,03	0,706	62028	4,60	

No	Waktu	ΔT _{c-a}	T _{f-c-a}	ρ	α	μ	k	Pr	L	Re _L	Gr	Ra _L	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw
1	07.00	0,2	30,4	1,1639	2,27E-05	1,86E-05	0,026	0,70	1	0	2,1E+07	1,5E+07	0	free	37
2	08.00	6,4	33,7	1,1512	2,31E-05	1,87E-05	0,027	0,70	1	67655	7,8E+08	5,5E+08	0,17	forced	-
3	09.00	8,8	40,4	1,1255	2,41E-05	1,90E-05	0,027	0,70	1	17754	9,6E+08	6,8E+08	3,06	free	132
4	10.00	18,8	42,4	1,1178	2,43E-05	1,91E-05	0,027	0,70	1	117005	2,0E+09	1,4E+09	0,15	forced	-
5	11.00	21,6	46,8	1,1009	2,49E-05	1,93E-05	0,028	0,70	1	85538	2,2E+09	1,5E+09	0,29	forced	-
6	12.00	19,0	44,5	1,1097	2,46E-05	1,92E-05	0,028	0,70	1	75124	2,0E+09	1,4E+09	0,35	forced	-
7	13.00	16,3	44,1	1,1111	2,46E-05	1,92E-05	0,028	0,70	1	138987	1,7E+09	1,2E+09	0,09	forced	-
8	14.00	14,2	40,6	1,1248	2,41E-05	1,90E-05	0,027	0,70	1	59116	1,5E+09	1,1E+09	0,44	forced	-
9	15.00	3,0	34,5	1,1481	2,32E-05	1,88E-05	0,027	0,70	1	61222	3,6E+08	2,5E+08	0,10	forced	-
10	16.00	2,6	32,3	1,1567	2,29E-05	1,87E-05	0,027	0,70	1	6201	3,2E+08	2,2E+08	8,25	free	91
11	17.00	2,0	29,5	1,1675	2,25E-05	1,85E-05	0,026	0,71	1	25207	2,6E+08	1,8E+08	0,41	forced	-

No	Waktu	Tm	p	α	μ	k	Pr	Ra	Nu	h	W	D	k ₀	b	γ	C _{bond}	k _p	m	F	F'
1	07.00	299	999	1,46E-07	9E-04	0,61	6,16	7E+05	7,44	396	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,21	0,91	0,411
2	08.00	302	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,79	2E+06	9,42	505	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,56	0,88	0,273
3	09.00	303	998	1,47E-07	8E-04	0,61	5,63	3E+06	10,11	543	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,14	0,89	0,282
4	10.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,45	3E+06	10,65	575	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,22	0,86	0,219
5	11.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,38	3E+06	10,23	553	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,25	0,86	0,224
6	12.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,43	2E+06	9,84	531	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,12	0,86	0,236
7	13.00	305	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,40	2E+06	9,88	534	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	8,42	0,85	0,223
8	14.00	306	997	1,48E-07	8E-04	0,62	5,28	3E+06	10,03	543	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,63	0,87	0,256
9	15.00	308	997	1,49E-07	7E-04	0,62	5,04	2E+06	9,26	504	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	7,43	0,88	0,280
10	16.00	310	996	1,50E-07	7E-04	0,62	4,80	1E+06	8,76	479	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,57	0,90	0,343
11	17.00	308	997	1,49E-07	7E-04	0,62	5,02	1E+05	5,33	290	0,19	0,013	429	0,32	0,001	137280	116	6,78	0,90	0,439

No	Waktu	h _w	h _{re-a}	h _{rp-c}	h _{p-c}	U _t	U _b	U _L	Tmr	Cp	m̄	F _R	Q _u
1	07.00	0,98	5,38	5,94	2,78	3,68	0,8	4,48	26	4181	0,013	0,4	159,6
2	08.00	9,11	5,57	6,60	3,08	5,83	0,8	6,63	29	4180	0,004	0,3	127,9
3	09.00	3,58	6,02	7,54	3,38	5,11	0,8	5,91	30	4180	0,004	0,3	185,3
4	10.00	13,04	6,10	7,85	3,28	7,04	0,8	7,84	32	4180	0,004	0,2	178,4
5	11.00	10,97	6,41	8,57	3,44	7,10	0,8	7,90	32	4180	0,004	0,2	174,6
6	12.00	10,07	6,25	8,36	3,46	6,86	0,8	7,66	32	4180	0,005	0,2	180,1
7	13.00	14,54	6,24	8,14	3,41	7,42	0,8	8,22	32	4180	0,004	0,2	153,9
8	14.00	8,60	6,00	7,11	2,92	5,95	0,8	6,75	33	4179	0,002	0,2	59,4
9	15.00	8,60	5,64	6,36	2,89	5,61	0,8	6,41	35	4179	0,003	0,3	86,4
10	16.00	2,42	5,49	6,15	2,81	4,20	0,8	5,00	37	4179	0,002	0,3	48,2
11	17.00	4,96	5,33	5,66	2,45	4,54	0,8	5,34	35	4179	-0,001	0,7	-1,5

Lampiran B-2 Data Perhitungan Bagian Storage

Tabel B-2.1 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 0 kg

No	Waktu	ΔT_{s-a}	T_{s-a}	ρ	α	μ	k	Pr	D	Re _D	Gr	Ra _D	Gr/(Re) ²	Nu	hw
1	07.00	3,2	29,6	1,167	2E-05	1,9E-05	0,0264	0,7052	0,65	0	1E+08	8E+07	0,00	free	53
2	08.00	2,9	32,9	1,154	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7035	0,65	4016	1E+08	7E+07	5,94	free	51
3	09.00	3,8	34,4	1,149	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7028	0,65	3982	1E+08	9E+07	7,88	free	55
4	10.00	3,8	36,9	1,139	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7016	0,65	11776	1E+08	8E+07	0,87	forced	45
5	11.00	2,4	37,7	1,136	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7012	0,65	85956	8E+07	5E+07	0,01	forced	225
6	12.00	2,3	38,1	1,134	2E-05	1,9E-05	0,0271	0,7009	0,65	101336	7E+07	5E+07	0,01	forced	257
7	13.00	1,9	38,4	1,133	2E-05	1,9E-05	0,0271	0,7008	0,65	77816	6E+07	4E+07	0,01	forced	208
8	14.00	5,3	37,7	1,136	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7012	0,65	50807	2E+08	1E+08	0,06	forced	147
9	15.00	7,4	37,7	1,136	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7012	0,65	39071	2E+08	2E+08	0,15	forced	119
10	16.00	11,6	38,3	1,134	2E-05	1,9E-05	0,0271	0,7009	0,65	46730	4E+08	3E+08	0,16	forced	138
11	17.00	13,5	37,2	1,138	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7014	0,65	15671	4E+08	3E+08	1,73	free	83
12	18.00	13,0	36,5	1,141	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7018	0,65	15739	4E+08	3E+08	1,67	free	82
13	19.00	11,8	34,9	1,147	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	11912	4E+08	3E+08	2,72	free	80
14	20.00	9,8	33,9	1,150	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7030	0,65	3993	3E+08	2E+08	20,46	free	76
15	21.00	8,3	33,1	1,153	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7034	0,65	24068	3E+08	2E+08	0,48	forced	81
16	22.00	8,6	32,3	1,157	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7039	0,65	12093	3E+08	2E+08	1,98	free	73
17	23.00	8,2	32,1	1,157	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7040	0,65	0	3E+08	2E+08	0,00	free	72
18	24.00	8,8	31,4	1,160	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7043	0,65	0	3E+08	2E+08	0,00	free	74
19	01.00	8,5	31,2	1,161	2E-05	1,9E-05	0,0265	0,7044	0,65	0	3E+08	2E+08	0,00	free	73
20	02.00	8,1	31,1	1,161	2E-05	1,9E-05	0,0265	0,7045	0,65	0	3E+08	2E+08	0,00	free	72

No	Waktu	T _s	C _p	(U _A) _{bs}	(U _A) _{es}	(U _A) _{ts}	(U _A) _s	dE _{st} /dt
1	07.00	304,2	4178	0,442	1,43	0,29	2,17	82,8
2	08.00	307,4	4178	0,442	1,41	0,29	2,14	82,2
3	09.00	309,3	4177	0,442	1,46	0,30	2,20	114,0
4	10.00	311,8	4177	0,442	1,36	0,28	2,08	138,1
5	11.00	311,9	4177	0,442	2,00	0,40	2,84	126,5
6	12.00	312,3	4177	0,442	2,03	0,40	2,88	138,5
7	13.00	312,4	4177	0,442	1,98	0,39	2,82	130,9
8	14.00	313,3	4176	0,442	1,88	0,37	2,70	96,5
9	15.00	314,4	4176	0,442	1,81	0,36	2,61	58,7
10	16.00	317,1	4176	0,442	1,86	0,37	2,68	-3,5
11	17.00	317,0	4176	0,442	1,66	0,33	2,44	-49,3
12	18.00	316,0	4176	0,442	1,66	0,33	2,43	-31,5
13	19.00	313,8	4176	0,442	1,64	0,33	2,42	-28,5
14	20.00	311,9	4177	0,442	1,62	0,33	2,39	-23,5
15	21.00	310,3	4177	0,442	1,64	0,33	2,42	-19,9
16	22.00	309,6	4177	0,442	1,60	0,32	2,36	-20,2
17	23.00	309,2	4177	0,442	1,59	0,32	2,35	-19,3
18	24.00	308,8	4177	0,442	1,60	0,32	2,37	-20,8
19	01.00	308,5	4177	0,442	1,60	0,32	2,36	-19,9
20	02.00	308,1	4177	0,442	1,59	0,32	2,35	-19,1

Tabel B-2.2 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 25 kg

No	Waktu	ΔT_{s-a}	T_a	ρ	α	μ	k	Pr	D	Re _D	Gr	Ra _D	Gr/(ReL) ²	Nu	hw
1	07.00	1,0	30	1,1674	2E-05	1,9E-05	0,0264	0,7053	0,65	0	4E+07	2E+07	0,00	free	36 1,48
2	08.00	0,8	32	1,1564	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7038	0,65	4029	3E+07	2E+07	1,57	free	33 1,33
3	09.00	3,6	35	1,1454	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7024	0,65	7926	1E+08	8E+07	1,84	free	54 2,22
4	10.00	3,7	36	1,1437	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7022	0,65	3953	1E+08	8E+07	7,54	free	54 2,24
5	11.00	1,4	36	1,1411	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7018	0,65	3938	4E+07	3E+07	2,78	free	39 1,60
6	12.00	0,2	36	1,1408	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7018	0,65	35423	5E+06	3E+06	0,00	forced	110 4,57
7	13.00	0,6	38	1,1355	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7011	0,65	105431	2E+07	1E+07	0,00	forced	265 11,03
8	14.00	2,5	37	1,1377	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7014	0,65	97946	8E+07	5E+07	0,01	forced	250 10,38
9	15.00	2,3	38	1,1361	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7012	0,65	3909	7E+07	5E+07	4,62	free	46 1,90
10	16.00	6,4	38	1,1339	2E-05	1,9E-05	0,0271	0,7009	0,65	23375	2E+08	1E+08	0,36	forced	79 3,28
11	17.00	11,5	37	1,1396	2E-05	1,9E-05	0,0270	0,7016	0,65	31433	4E+08	3E+08	0,37	forced	100 4,15
12	18.00	11,9	36	1,1427	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7020	0,65	35526	4E+08	3E+08	0,30	forced	110 4,57
13	19.00	13,0	36	1,1443	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7023	0,65	3957	4E+08	3E+08	26,87	free	83 3,42
14	20.00	12,9	35	1,1445	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7023	0,65	7916	4E+08	3E+08	6,67	free	83 3,41
15	21.00	13,8	35	1,1448	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7023	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	84 3,48
16	22.00	13,2	35	1,1459	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7025	0,65	3966	4E+08	3E+08	27,32	free	83 3,44
17	23.00	13,6	35	1,1471	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	3974	4E+08	3E+08	28,07	free	84 3,47
18	24.00	14,6	34	1,1490	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	0	5E+08	3E+08	0,00	free	86 3,56
19	01.00	14,5	34	1,1491	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	0	5E+08	3E+08	0,00	free	86 3,56
20	02.00	14,5	34	1,1491	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	0	5E+08	3E+08	0,00	free	86 3,56

No	Waktu	T _s	C _p	(U _A) _{hs}	(U _A) _{es}	(U _A) _{rs}	(U _A) _s	dF _{Sq} /dt
1	07.00	303,0	4178	0,442	1,22	0,25	1,92	79,2
2	08.00	305,8	4178	0,442	1,16	0,24	1,85	91,9
3	09.00	306,5	4178	0,442	1,45	0,29	2,18	136,3
4	10.00	306,9	4178	0,442	1,45	0,30	2,19	160,5
5	11.00	308,7	4177	0,442	1,27	0,26	1,97	162,2
6	12.00	309,4	4177	0,442	1,78	0,36	2,58	155,3
7	13.00	311,1	4177	0,442	2,04	0,40	2,89	132,7
8	14.00	311,5	4177	0,442	2,03	0,40	2,87	103,0
9	15.00	311,8	4177	0,442	1,36	0,28	2,08	98,1
10	16.00	314,4	4176	0,442	1,64	0,33	2,41	24,7
11	17.00	315,5	4176	0,442	1,74	0,35	2,53	-39,0
12	18.00	314,9	4176	0,442	1,78	0,36	2,58	-30,6
13	19.00	315,0	4176	0,442	1,66	0,33	2,43	-31,6
14	20.00	314,9	4176	0,442	1,66	0,33	2,43	-31,4
15	21.00	315,3	4176	0,442	1,67	0,33	2,44	-33,6
16	22.00	314,7	4176	0,442	1,66	0,33	2,44	-32,2
17	23.00	314,6	4176	0,442	1,67	0,33	2,44	-33,1
18	24.00	314,6	4176	0,442	1,68	0,34	2,46	-35,7
19	01.00	314,5	4176	0,442	1,68	0,34	2,45	-35,6
20	02.00	314,5	4176	0,442	1,68	0,34	2,45	-35,6

Tabel B-2.3 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 50 kg

No	Waktu	ΔT_{s-a}	T_a	ρ	α	μ	k	Pr	D	Re _D	Gr	Ra _D	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw	
1	07.00	0,3	29	1,1707	2E-05	1,8E-05	0,0263	0,7057	0,65	0	1E+07	8E+06	0,00	free	24	0,99
2	08.00	6,2	33	1,1523	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	4004	2E+08	1E+08	12,80	free	65	2,68
3	09.00	5,5	33	1,1530	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7034	0,65	4009	2E+08	1E+08	11,45	free	63	2,58
4	10.00	4,2	33	1,1524	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	32040	1E+08	1E+08	0,14	forced	102	4,18
5	11.00	4,4	33	1,1527	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	44075	1E+08	1E+08	0,07	forced	132	5,40
6	12.00	4,4	33	1,1527	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	88149	1E+08	1E+08	0,02	forced	230	9,44
7	13.00	3,6	34	1,1493	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	55814	1E+08	8E+07	0,04	forced	159	6,55
8	14.00	0,6	34	1,1488	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7028	0,65	3984	2E+07	2E+07	1,35	free	31	1,26
9	15.00	1,6	34	1,1490	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	35865	5E+07	4E+07	0,04	forced	111	4,59
10	16.00	6,9	34	1,1504	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7030	0,65	55902	2E+08	2E+08	0,07	forced	159	6,55
11	17.00	8,5	34	1,1491	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	67754	3E+08	2E+08	0,06	forced	186	7,65
12	18.00	10,3	34	1,1496	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	3988	3E+08	2E+08	21,28	free	77	3,17
13	19.00	10,0	34	1,1501	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7030	0,65	3991	3E+08	2E+08	20,77	free	76	3,14
14	20.00	10,0	34	1,1502	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7030	0,65	15967	3E+08	2E+08	1,29	free	76	3,14
15	21.00	10,9	33	1,1523	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	4004	4E+08	3E+08	22,58	free	79	3,23
16	22.00	11,1	34	1,1518	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7032	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	79	3,26
17	23.00	12,0	33	1,1540	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7035	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	81	3,34
18	24.00	11,8	33	1,1543	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7036	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	81	3,33
19	01.00	11,8	33	1,1543	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7036	0,65	4017	4E+08	3E+08	24,60	free	81	3,33
20	02.00	11,5	33	1,1550	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7036	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	80	3,30

No	Waktu	T _s	C _p	(U/A) _{bs}	(U/A) _{es}	(U/A) _{ts}	(U/A) _s	dE _{st} /dt
1	07.00	301,8	4179	0,442	0,99	0,21	1,65	37,0
2	08.00	303,4	4178	0,442	1,54	0,31	2,30	146,4
3	09.00	303,5	4178	0,442	1,52	0,31	2,27	146,1
4	10.00	304,3	4178	0,442	1,74	0,35	2,54	163,5
5	11.00	304,2	4178	0,442	1,84	0,37	2,65	174,3
6	12.00	304,2	4178	0,442	2,01	0,40	2,84	166,5
7	13.00	305,4	4178	0,442	1,91	0,38	2,73	157,5
8	14.00	307,7	4177	0,442	1,13	0,23	1,81	106,4
9	15.00	308,1	4177	0,442	1,78	0,36	2,58	62,1
10	16.00	310,4	4177	0,442	1,91	0,38	2,73	19,6
11	17.00	311,5	4177	0,442	1,95	0,39	2,78	-27,0
12	18.00	312,3	4177	0,442	1,62	0,33	2,39	-24,5
13	19.00	312,0	4177	0,442	1,62	0,33	2,39	-23,9
14	20.00	312,0	4177	0,442	1,62	0,33	2,39	-23,8
15	21.00	311,9	4177	0,442	1,63	0,33	2,40	-26,1
16	22.00	312,1	4177	0,442	1,64	0,33	2,41	-26,7
17	23.00	312,0	4177	0,442	1,65	0,33	2,42	-28,9
18	24.00	311,8	4177	0,442	1,65	0,33	2,42	-28,6
19	01.00	311,8	4177	0,442	1,65	0,33	2,42	-28,6
20	02.00	311,5	4177	0,442	1,64	0,33	2,41	-27,6

Tabel B-2.4 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 75 kg

No	Waktu	ΔT_{s-a}	T_a	ρ	α	μ	k	Pr	D	Re _D	Gr	Ra _D	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw	
1	07.00	3,0	29	1,1713	2E-05	1,8E-05	0,0263	0,7058	0,65	0	1E+08	8E+07	0,00	free	53	2,13
2	08.00	5,7	31	1,1610	2E-05	1,9E-05	0,0265	0,7044	0,65	0	2E+08	1E+08	0,00	free	64	2,62
3	09.00	4,5	32	1,1587	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7041	0,65	4043	2E+08	1E+08	9,31	free	59	2,41
4	10.00	3,5	33	1,1529	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7034	0,65	12024	1E+08	8E+07	0,80	forced	46	1,90
5	11.00	4,1	33	1,1522	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	4004	1E+08	1E+08	8,53	free	57	2,34
6	12.00	3,4	34	1,1489	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	27891	1E+08	8E+07	0,14	forced	91	3,75
7	13.00	2,3	35	1,1467	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	59568	7E+07	5E+07	0,02	forced	168	6,91
8	14.00	0,3	35	1,1449	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7023	0,65	47525	1E+07	7E+06	0,00	forced	140	5,77
9	15.00	2,4	35	1,1455	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7024	0,65	39638	8E+07	5E+07	0,05	forced	121	4,98
10	16.00	5,7	35	1,1469	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	3972	2E+08	1E+08	11,70	free	63	2,59
11	17.00	11,1	36	1,1442	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7022	0,65	3956	4E+08	3E+08	22,84	free	78	3,24
12	18.00	11,7	36	1,1430	2E-05	1,9E-05	0,0269	0,7021	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	80	3,30
13	19.00	12,3	35	1,1457	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7024	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	81	3,36
14	20.00	12,1	35	1,1461	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7025	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	81	3,34
15	21.00	12,5	35	1,1473	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	82	3,38
16	22.00	12,3	34	1,1496	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	3988	4E+08	3E+08	25,43	free	82	3,36
17	23.00	11,4	34	1,1493	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7029	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	80	3,28
18	24.00	12,1	34	1,1518	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7032	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	82	3,35
19	01.00	11,6	33	1,1528	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7034	0,65	4007	4E+08	3E+08	24,15	free	81	3,31
20	02.00	10,8	32	1,1564	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7038	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	79	3,23

No	Waktu	T _s	C _p	(U/A) _{bs}	(U/A) _{es}	(U/A) _{ts}	(U/A) _s	dE _{st} /dt
1	07.00	300,0	4179	0,442	1,42	0,29	2,16	44,1
2	08.00	301,4	4179	0,442	1,53	0,31	2,28	135,5
3	09.00	302,6	4178	0,442	1,49	0,30	2,23	168,9
4	10.00	304,6	4178	0,442	1,36	0,28	2,08	205,5
5	11.00	304,4	4178	0,442	1,47	0,30	2,22	192,6
6	12.00	305,6	4178	0,442	1,70	0,34	2,48	194,4
7	13.00	306,8	4178	0,442	1,92	0,38	2,75	157,1
8	14.00	308,2	4177	0,442	1,86	0,37	2,68	128,5
9	15.00	309,4	4177	0,442	1,81	0,36	2,62	99,4
10	16.00	310,7	4177	0,442	1,53	0,31	2,28	49,5
11	17.00	314,1	4176	0,442	1,63	0,33	2,40	-38,6
12	18.00	314,7	4176	0,442	1,64	0,33	2,41	-28,3
13	19.00	314,3	4176	0,442	1,65	0,33	2,42	-29,8
14	20.00	314,1	4176	0,442	1,65	0,33	2,42	-29,3
15	21.00	314,0	4176	0,442	1,65	0,33	2,43	-30,2
16	22.00	313,3	4176	0,442	1,65	0,33	2,43	-29,7
17	23.00	312,9	4176	0,442	1,64	0,33	2,41	-27,5
18	24.00	312,6	4176	0,442	1,65	0,33	2,42	-29,3
19	01.00	312,1	4177	0,442	1,64	0,33	2,42	-28,0
20	02.00	310,8	4177	0,442	1,63	0,33	2,40	-25,8

Tabel B-2.5 Perhitungan data bagian *storage* dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 100 kg

No	Waktu	ΔT_{s-a}	T_a	ρ	α	μ	k	Pr	D	Re _D	Gr	Ra _D	Gr/(Re _L) ²	Nu	hw	
1	07.00	3,5	29	1,1703	2E-05	1,8E-05	0,0264	0,7056	0,65	0	1E+08	9E+07	0,00	free	55	2,24
2	08.00	1,7	30	1,1668	2E-05	1,9E-05	0,0264	0,7052	0,65	45007	6E+07	4E+07	0,03	forced	134	5,44
3	09.00	7,5	32	1,1568	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7039	0,65	12095	3E+08	2E+08	1,74	free	70	2,87
4	10.00	3,1	31	1,1598	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7043	0,65	80991	1E+08	7E+07	0,02	forced	215	8,77
5	11.00	4,1	34	1,1503	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7030	0,65	59886	1E+08	1E+08	0,04	forced	168	6,93
6	12.00	2,2	34	1,1505	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7031	0,65	51916	7E+07	5E+07	0,03	forced	150	6,17
7	13.00	2,4	35	1,1470	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	95351	8E+07	6E+07	0,01	forced	245	10,09
8	14.00	0,7	34	1,1507	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7031	0,65	39947	2E+07	2E+07	0,01	forced	121	5,00
9	15.00	3,3	35	1,1476	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7027	0,65	39764	1E+08	8E+07	0,07	forced	121	4,99
10	16.00	7,4	35	1,1475	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7027	0,65	3976	2E+08	2E+08	15,23	free	69	2,83
11	17.00	8,6	35	1,1471	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7026	0,65	15894	3E+08	2E+08	1,11	free	72	2,98
12	18.00	8,8	34	1,1486	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7028	0,65	3982	3E+08	2E+08	18,25	free	73	3,01
13	19.00	9,1	35	1,1480	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7027	0,65	0	3E+08	2E+08	0,00	free	74	3,04
14	20.00	8,7	34	1,1488	2E-05	1,9E-05	0,0268	0,7028	0,65	27887	3E+08	2E+08	0,37	forced	91	3,75
15	21.00	9,6	34	1,1509	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7031	0,65	3996	3E+08	2E+08	19,95	free	75	3,10
16	22.00	11,0	34	1,1520	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7033	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	79	3,25
17	23.00	12,1	33	1,1539	2E-05	1,9E-05	0,0267	0,7035	0,65	4014	4E+08	3E+08	25,11	free	82	3,35
18	24.00	11,2	33	1,1554	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7037	0,65	2012	4E+08	3E+08	93,68	free	80	3,28
19	01.00	10,4	32	1,1570	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7039	0,65	0	4E+08	2E+08	0,00	free	78	3,20
20	02.00	10,9	32	1,1561	2E-05	1,9E-05	0,0266	0,7038	0,65	0	4E+08	3E+08	0,00	free	79	3,25

No	Waktu	T _s	C _p	(U _A) _{hs}	(U _A) _{es}	(U _A) _{ts}	(U _A) _s	dE _{st} dt
1	07.00	300,0	4179	0,442	1,45	0,30	2,19	167,3
2	08.00	301,9	4179	0,442	1,84	0,37	2,65	132,3
3	09.00	301,5	4179	0,442	1,58	0,32	2,34	202,8
4	10.00	303,0	4178	0,442	1,99	0,39	2,82	187,0
5	11.00	304,9	4178	0,442	1,92	0,38	2,75	185,9
6	12.00	305,8	4178	0,442	1,89	0,37	2,70	186,1
7	13.00	306,6	4178	0,442	2,02	0,40	2,86	160,8
8	14.00	307,2	4178	0,442	1,81	0,36	2,62	57,5
9	15.00	309,3	4177	0,442	1,81	0,36	2,62	77,8
10	16.00	311,4	4177	0,442	1,57	0,32	2,33	31,1
11	17.00	312,1	4177	0,442	1,59	0,32	2,36	-21,7
12	18.00	311,8	4177	0,442	1,60	0,32	2,36	-20,8
13	19.00	312,1	4177	0,442	1,60	0,32	2,37	-21,6
14	20.00	311,7	4177	0,442	1,70	0,34	2,48	-21,5
15	21.00	311,6	4177	0,442	1,61	0,33	2,38	-22,9
16	22.00	312,0	4177	0,442	1,63	0,33	2,41	-26,5
17	23.00	312,1	4177	0,442	1,65	0,33	2,42	-29,2
18	24.00	311,2	4177	0,442	1,64	0,33	2,41	-27,1
19	01.00	310,4	4177	0,442	1,63	0,33	2,40	-24,9
20	02.00	310,9	4177	0,442	1,63	0,33	2,41	-26,2

Lampiran B-3 Data Perhitungan Efisiensi

Tabel B-3.1 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 0 kg

No	Waktu	Luas Q_U	Luas Q_S	Luas Gr	η_k	η_s	η_t
1	07.00				15%	66%	10%
2	08.00	89,0	82,5	397,1			
3	09.00	105,3	98,1	595,6			
4	10.00	134,2	126,1	772,1			
5	11.00	139,7	132,3	860,3			
6	12.00	139,1	132,5	904,4			
7	13.00	140,6	134,7	882,4			
8	14.00	123,5	113,7	757,4			
9	15.00	94,5	77,6	566,2			
10	16.00	52,7	27,6	338,2			
11	17.00	5,4	-26,4	117,6			
12	18.00		-40,4				
13	19.00		-30,0				
14	20.00		-26,0				
15	21.00		-21,7				
16	22.00		-20,1				
17	23.00		-19,7				
18	24.00		-20,1				
19	01.00		-20,4				
20	02.00		-19,5				
Σ		1024,0	680,8	6191,2			

Tabel B-3.2 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 25 kg

No	Waktu	Luas Q_U	Luas Q_S	Luas G_T	η_k	η_s	η_t
1	07.00				15%	70%	11%
2	08.00	87,2	85,6	426,5			
3	09.00	110,9	114,1	625,0			
4	10.00	140,5	148,4	794,1			
5	11.00	156,0	161,3	904,4			
6	12.00	157,2	158,7	926,5			
7	13.00	144,7	144,0	889,7			
8	14.00	122,2	117,9	779,4			
9	15.00	106,4	100,6	595,6			
10	16.00	71,5	61,4	360,3			
11	17.00	15,1	-7,1	125,0			
12	18.00		-34,8				
13	19.00		-31,1				
14	20.00		-31,5				
15	21.00		-32,5				
16	22.00		-32,9				
17	23.00		-32,6				
18	24.00		-34,4				
19	01.00		-35,7				
20	02.00		-35,6				
Σ		1111,8	783,7	6426,5			

Tabel B-3.3 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 50 kg

No	Waktu	Luas Q_U	Luas Q_S	Luas G_T	η_k	η_s	η_t
1	07.00				17%	82%	14%
2	08.00	84,9	91,7	345,6			
3	09.00	132,9	146,3	573,5			
4	10.00	143,2	154,8	720,6			
5	11.00	157,8	168,9	875,0			
6	12.00	158,5	170,4	897,1			
7	13.00	150,9	162,0	852,9			
8	14.00	127,6	131,9	654,4			
9	15.00	86,8	84,3	419,1			
10	16.00	52,2	40,9	286,8			
11	17.00	17,5	-3,7	132,4			
12	18.00		-25,8				
13	19.00		-24,2				
14	20.00		-23,8				
15	21.00		-24,9				
16	22.00		-26,4				
17	23.00		-27,8				
18	24.00		-28,8				
19	01.00		-28,6				
20	02.00		-28,1				
Σ		1112,3	909,0	5757,4			

Tabel B-3.4 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 75 kg

No	Waktu	Luas Q_U	Luas Q_S	Luas G_T	η_k	η_s	η_t
1	07.00				18%	81,737%	15%
2	08.00	80,1	89,8	323,5			
3	09.00	140,8	152,2	632,4			
4	10.00	178,6	187,2	838,2			
5	11.00	190,9	199,0	919,1			
6	12.00	184,8	193,5	911,8			
7	13.00	168,4	175,8	867,6			
8	14.00	139,3	142,8	735,3			
9	15.00	116,7	114,0	588,2			
10	16.00	84,0	74,4	404,4			
11	17.00	25,2	5,4	147,1			
12	18.00		-33,4				
13	19.00		-29,0				
14	20.00		-29,6				
15	21.00		-29,8				
16	22.00		-30,0				
17	23.00		-28,6				
18	24.00		-28,4				
19	01.00		-28,7				
20	02.00		-26,9				
Σ		1308,9	1069,9	6367,6			

Tabel B-3.5 Perhitungan efisiensi dengan menggunakan variasi tambahan massa batuan sebesar 100 kg

No	Waktu	Luas Q_U	Luas Q_S	Luas G_T	η_k	η_s	η_t
1	07.00				18%	84%	15%
2	08.00	143,7	149,8	529,4			
3	09.00	156,6	167,5	691,2			
4	10.00	181,8	194,9	911,8			
5	11.00	176,5	186,4	992,6			
6	12.00	177,4	186,0	948,5			
7	13.00	167,0	173,4	889,7			
8	14.00	106,7	109,2	566,2			
9	15.00	72,9	67,7	352,9			
10	16.00	67,3	54,4	316,2			
11	17.00	23,3	4,7	125,0			
12	18.00		-21,3				
13	19.00		-21,2				
14	20.00		-21,5				
15	21.00		-22,2				
16	22.00		-24,7				
17	23.00		-27,8				
18	24.00		-28,1				
19	01.00		-26,0				
20	02.00		-25,6				
Σ		1273,3	1075,7	6323,5			

Tabel C.1 Urutan nomor hari dalam satu tahun

Table 1.6.1 Recommended Average Days for Months and Values of n by Months ^a				
Month	n for i th Day of Month	For Average Day of Month		δ
		Date	n	
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

^aFrom Klein (1977). Do not use for $|\phi| > 66.5^\circ$.

Tabel C.2 Properties dari solid metal

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids ^a															
Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)									
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218					
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	482	798	949	1033	1146					
						473	787	925	1042						
Alloy 995, Cast (4.5% Cu)	2790	883	168	68.2			174	185							
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8	78.7			
						203	1114	2191	2604	2823	3018	3227	3519		
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04							
						112	120	127	10.6	9.60	9.85				
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	1892	2160	2338				
						128	600	1463							
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	90.3	94.7							
						198	222	242							
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4	
						192	584	484	542	581	616	682	779	937	
						167	122	85.4	67.4	58.2	52.1	49.3	42.5		
Cobalt	1760	8862	421	99.2	26.6	167	379	450	503	550	628	733	674		
						236	379	450							
Copper Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339			
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al) Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451	480			
						42	52	52	59						
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1104	8780	355	54	17	785	460	545	503	550	628	733	674		
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1188	8530	380	110	33.9	75	—	—	—	—	—	—			
						95	137	149	425						
Germanium	1493	8920	384	23	6.71	17	19	395	475						
						237	362	395							
	1211	5360	372	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4			
						190	290	337	348	357	375	395			

TABLE A.1 Continued

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)										
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^4$ (m ² /s)	k (W/m · K)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Platinum	2045	21450	133	71.6	25.1	77.5	72.6	71.8	73.2	75.6	78.7	82.6	89.5	99.4		
Pure						100	125	136	141	146	152	157	165	179		
Alloy 60Pt–40Rh (60% Pt, 40% Rh)	1800	16630	162	47	17.4											
Rhenium	3453	21100	136	47.9	16.7	58.9	51.0	46.1	44.2	44.1	44.6	45.7	47.8	51.9		
						97	127	139	145	151	156	162	171	186		
Rhodium	2236	12450	243	150	49.6	186	154	146	136	127	121	116	110	112		
						147	220	253	274	293	311	327	349	376		
Silicon	1685	2330	712	148	89.2	884	264	98.9	61.9	42.2	31.2	25.7	22.7			
						259	556	790	867	913	946	967	992			
Silver	1235	10500	235	429	174	444	430	425	412	396	379	361				
						187	225	239	250	262	277	292				
Tantalum	3269	16600	140	57.5	24.7	59.2	57.5	57.8	58.6	59.4	60.2	61.0	62.2	64.1	65.6	
						110	133	144	146	149	152	155	160	172	189	
Thorium	2023	11700	118	54.0	39.1	59.8	54.6	54.5	55.8	56.9	56.9	58.7				
						99	112	124	134	145	156	167				
Tin	505	7310	227	66.6	40.1	85.2	73.3	62.2								
						188	715	743								
Titanium	1953	4500	522	21.9	9.32	30.5	24.5	20.4	19.4	19.7	20.7	22.0	24.5			
						300	465	551	591	633	675	720	760	800		
Tungsten	3660	19300	132	174	68.3	208	186	159	137	125	118	113	107	100	95	
						87	122	137	142	145	148	152	157	167	176	
Uranium	1406	19070	116	27.6	12.5	21.7	25.1	29.6	34.0	38.8	43.9	49.0				
						94	108	125	146	176	180	161				
Vanadium	2192	6100	489	30.7	10.3	35.8	31.3	31.3	33.3	35.7	38.2	40.8	44.6	50.9		
						258	430	515	540	563	597	645	714	807		
Zinc	693	7140	389	116	41.8	117	118	111	103							
						297	367	402	436							
Zirconium	2125	6570	278	22.7	12.4	33.2	25.2	21.6	20.7	21.6	23.7	26.0	28.8	33.0		
						205	264	300	322	342	362	384	407	431	455	

Tabel C.3 Properties dari material insulasi

Insulating Materials and Systems			
Description/Composition	Typical Properties at 300 K		
	Density, ρ (kg/m ³)	Thermal Conductivity, k (W/m·K)	Specific Heat, c_p (J/kg·K)
Blanket and Batt			
Glass fiber, paper faced	16	0.046	—
	28	0.038	—
	40	0.035	—
Glass fiber, coated; duct liner	32	0.038	835
Board and Slab			
Cellular glass	145	0.058	1000
Glass fiber, organic bonded	105	0.036	795
Polystyrene, expanded			
Extruded (R-12s)	55	0.027	1210
Molded beads	16	0.040	1210
Mineral fiberboard; roofing material	265	0.049	—
Wood, shredded/cemented	350	0.087	1590
Cork	120	0.039	1800
Loose Fill			
Cork, granulated	160	0.045	—
Diatomaceous silica, coarse	350	0.069	—
Powder	400	0.091	—
Diatomaceous silica, fine powder	200	0.052	—
	275	0.061	—
Glass fiber, poured or blown	16	0.043	835
Vermiculite, flakes	80	0.068	835
	160	0.063	1000
Formed/Foamed-in-Place			
Mineral wool granules with asbestos/inorganic binders, sprayed	190	0.046	—
Polyvinyl acetate cork mastic; sprayed or troweled	—	0.100	—
Urethane, two-part mixture; rigid foam	70	0.026	1045
Reflective			
Aluminum foil separating fluffy glass mats; 10–12 layers, evacuated; for cryogenic applications (150 K)	40	0.00016	—
Aluminum foil and glass paper laminate; 75–150 layers, evacuated; for cryogenic application (150 K)	120	0.000017	—
Typical silica powder, evacuated	160	0.0017	—

Tabel C.4 Properties air jenuh dan udara pada satu atm

Properties of Saturated Water							
T, C	ρ , kg/m ³	C_p , J/kgK	k , W/mK	μ , Pa s	α , m ² /s	Pr	
0	1002	4218	0.552	17.9×10^{-4}	1.31×10^{-7}	13.06	
20	1001	4182	0.597	10.1×10^{-4}	1.43×10^{-7}	7.02	
40	995	4178	0.628	6.55×10^{-4}	1.51×10^{-7}	4.34	
60	985	4184	0.651	4.71×10^{-4}	1.55×10^{-7}	3.02	
80	974	4196	0.668	3.55×10^{-4}	1.64×10^{-7}	2.22	
100	960	4216	0.680	2.82×10^{-4}	1.68×10^{-7}	1.74	
120	945	4250	0.685	2.33×10^{-4}	1.71×10^{-7}	1.45	
140	928	4283	0.684	1.99×10^{-4}	1.72×10^{-7}	1.24	
160	910	4342	0.680	1.73×10^{-4}	1.73×10^{-7}	1.10	
180	889	4417	0.675	1.54×10^{-4}	1.72×10^{-7}	1.00	
200	867	4505	0.665	1.39×10^{-4}	1.71×10^{-7}	0.94	
220	842	4610	0.652	1.26×10^{-4}	1.68×10^{-7}	0.89	
240	816	4756	0.635	1.17×10^{-4}	1.64×10^{-7}	0.88	
260	786	4949	0.611	1.08×10^{-4}	1.58×10^{-7}	0.87	
280	753	5208	0.580	1.02×10^{-4}	1.48×10^{-7}	0.91	
300	714	5728	0.540	0.96×10^{-4}	1.32×10^{-7}	1.02	

Properties of Air at One Atmosphere							
T, C	ρ , kg/m ³	C_p , J/kgK	k , W/mK	μ , Pa s	α , m ² /s	Pr	
0	1.292	1006	0.0242	1.72×10^{-5}	1.86×10^{-5}	0.72	
20	1.204	1006	0.0257	1.81×10^{-5}	2.12×10^{-5}	0.71	
40	1.127	1007	0.0272	1.90×10^{-5}	2.40×10^{-5}	0.70	
60	1.059	1008	0.0287	1.99×10^{-5}	2.69×10^{-5}	0.70	
80	0.999	1010	0.0302	2.09×10^{-5}	3.00×10^{-5}	0.70	
100	0.946	1012	0.0318	2.18×10^{-5}	3.32×10^{-5}	0.69	
120	0.898	1014	0.0333	2.27×10^{-5}	3.66×10^{-5}	0.69	
140	0.854	1016	0.0345	2.34×10^{-5}	3.98×10^{-5}	0.69	
160	0.815	1019	0.0359	2.42×10^{-5}	4.32×10^{-5}	0.69	
180	0.779	1022	0.0372	2.50×10^{-5}	4.67×10^{-5}	0.69	
200	0.746	1025	0.0386	2.57×10^{-5}	5.05×10^{-5}	0.68	
220	0.715	1028	0.0399	2.64×10^{-5}	5.43×10^{-5}	0.68	
240	0.688	1032	0.0412	2.72×10^{-5}	5.80×10^{-5}	0.68	
260	0.662	1036	0.0425	2.79×10^{-5}	6.20×10^{-5}	0.68	
280	0.638	1040	0.0437	2.86×10^{-5}	6.59×10^{-5}	0.68	
300	0.616	1045	0.0450	2.93×10^{-5}	6.99×10^{-5}	0.68	

Tabel C.5 Properties dari material bangunan

<i>Structural Building Materials</i>			
Description/Composition	Typical Properties at 300 K		
	Density, ρ (kg/m ³)	Thermal Conductivity, k (W/m·K)	Specif. Heat, c_p (J/kg·K)
Building Boards			
Asbestos-cement board	1920	0.58	—
Gypsum or plaster board	800	0.17	—
Plywood	545	0.12	1215
Sheathing, regular density	290	0.055	1300
Acoustic tile	290	0.058	1340
Hardboard, siding	640	0.094	1170
Hardboard, high density	1010	0.15	1380
Particle board, low density	590	0.078	1300
Particle board, high density	1000	0.170	1300
Woods			
Hardwoods (oak, maple)	720	0.16	1255
Softwoods (fir, pine)	510	0.12	1380
Masonry Materials			
Cement mortar	1860	0.72	780
Brick, common	1920	0.72	835
Brick, face	2083	1.3	—
Clay tile, hollow	—	—	—
1 cell deep, 10 cm thick	—	0.52	—
3 cells deep, 30 cm thick	—	0.69	—
Concrete block, 3 oval cores	—	1.0	—
Sand/gravel, 20 cm thick	—	0.67	—
Cinder aggregate, 20 cm thick	—	—	—
Concrete block, rectangular core	—	1.1	—
2 cores, 20 cm thick, 16 kg	—	0.60	—
Same with filled cores	—	—	—
Plastering Materials			
Cement plaster, sand aggregate	1860	0.72	—
Gypsum plaster, sand aggregate	1680	0.22	1085
Gypsum plaster, vermiculite aggregate	720	0.25	—

Tabel C.6 properties material lainnya

Other Materials (Continued)	Descriptive Composition	Temperature (K)	Density, ρ (kg/m ³)	Thermal Conductivity, k (W/m ² ·K)	Specific Heat, c_p (J/kg·K)
Ice	Ice	273	970	1.88	7040
		253	—	2.03	1945
Leather (sole)	Leather (sole)	300	998	0.159	—
Paper	Paper	300	930	0.180	1340
Rock	Paraffin	300	900	0.240	2890
	Granite, Bare	300	2630	2.79	775
	Limestone, Silem	300	2220	2.15	810
	Marble, Hilsen	300	2680	2.80	830
	Quartzite, Sioux	300	2650	2.38	1105
	Sandstone, Berea	300	2150	2.50	745
Rubber, vulcanized	Rubber, vulcanized	300	1100	0.13	2010
Soil	Soil	300	1190	0.16	—
Sand	Sand	300	1515	0.27	800
Soil	Soil	300	2000	0.52	1840
Snow	Snow	273	110	0.049	—
		300	500	0.190	—
Teflon	Teflon	300	2200	0.35	—
		400	—	0.45	—
Tissue, human	Skin	300	—	0.37	—
	Fat layer (adipose)	300	—	0.2	—
	Muscle	300	—	0.5	—
Wood, cross grain	Wood, cross grain	300	140	0.035	—
Balsa	Balsa	300	465	0.097	—
Cypress	Cypress	300	415	0.11	2720
Fir	Fir	300	545	0.17	2385
Cork	Cork	300	640	0.15	2805
Yellow pine	Yellow pine	300	435	0.11	—
White pine	White pine	300	—	—	—
Wood, radial	Wood, radial	300	545	0.19	2385
Cork	Cork	300	420	0.14	2720

Tabel C.7 Properties radiasi surya pada beberapa material

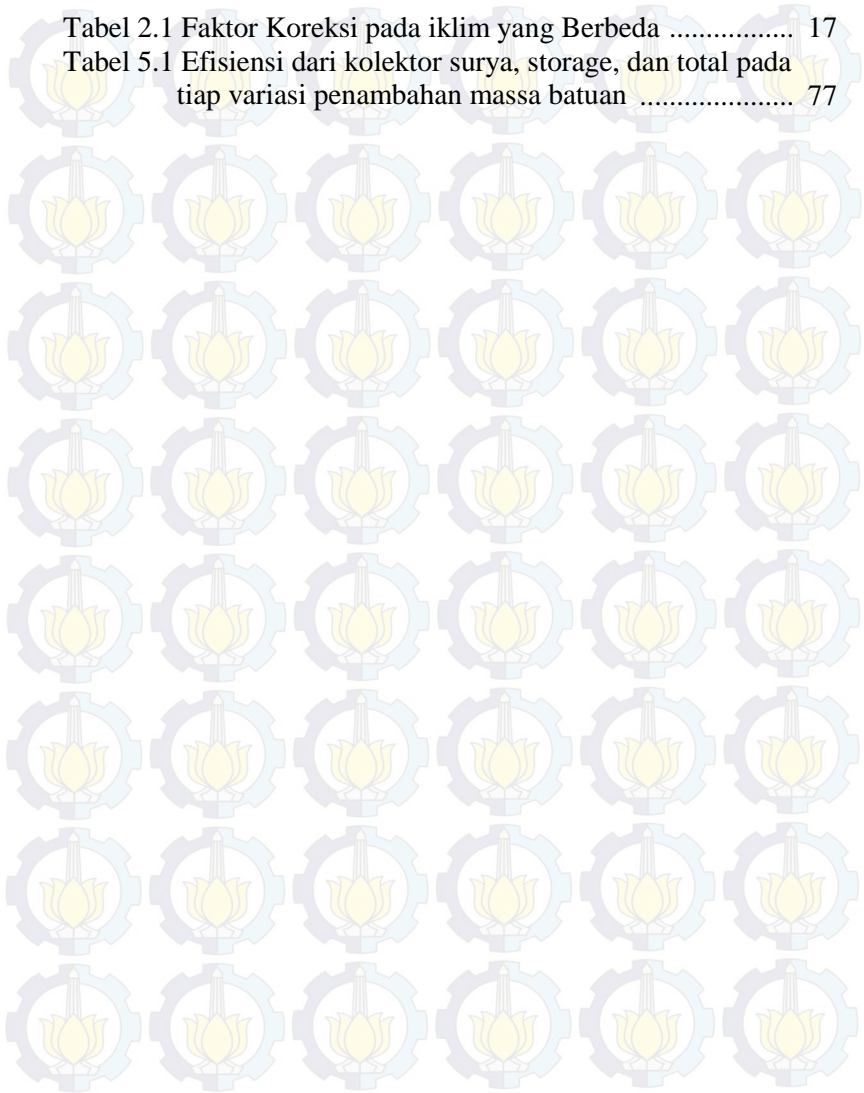
TABLE A.12 Solar Radiative Properties for Selected Materials^a

Description/Composition	α_s	ϵ^b	α_s/ϵ	τ_s
Aluminum				
Polished	0.09	0.03	3.0	
Anodized	0.14	0.84	0.17	
Quartz overcoated	0.11	0.37	0.30	
Foil	0.15	0.05	3.0	
Brick, red (Purdue)	0.63	0.93	0.68	
Concrete	0.60	0.88	0.68	
Galvanized sheet metal				
Clean, new	0.65	0.13	5.0	
Oxidized, weathered	0.80	0.28	2.9	
Glass, 3.2-mm thickness				
Float or tempered				0.79
Low iron oxide type				0.88
Metal, plated				
Black sulfide	0.92	0.10	9.2	
Black cobalt oxide	0.93	0.30	3.1	
Black nickel oxide	0.92	0.08	11	
Black chrome	0.87	0.09	9.7	
Mylar, 0.13-mm thickness				0.87
Paints				
Black (Parsons)	0.98	0.98	1.0	
White, acrylic	0.26	0.90	0.29	
White, zinc oxide	0.16	0.93	0.17	
Plexiglas, 3.2-mm thickness				0.90
Snow				
Fine particles, fresh	0.13	0.82	0.16	
Ice granules	0.33	0.89	0.37	
Tedlar, 0.10-mm thickness				0.92
Teflon, 0.13-mm thickness				0.92



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Faktor Koreksi pada iklim yang Berbeda	17
Tabel 5.1 Efisiensi dari kolektor surya, storage, dan total pada tiap variasi penambahan massa batuan	77





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Bagus Setiawan lahir di Gresik, 13 Juli 1993. Merupakan anak kedua dari 3 bersaudara pasangan Herman Suleha dan Sunarsih. Pendidikan formal yang ditempuh adalah SD Negeri Boboh (1999), SMP Negeri 14 Surabaya (2005), SMA Negeri 12 Surabaya (2008). Sejak muda, penulis selalu tertarik dengan dunia teknik. Oleh karena itu, penulis memilih untuk melanjutkan studinya di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang terdaftar dengan NRP 2111100107.

Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin dalam departemen Hubungan Luar untuk meningkatkan *soft skill*. Penulis juga aktif sebagai Asisten Praktikum Perpindahan Panas dan Massa, serta aktif dalam beberapa kepanitiaan tingkat jurusan, institut, dan nasional. Di Jurusan Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Konversi Energi sebagai bahasan Tugas Akhir yang memiliki topik Energi Surya dan dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Djatmiko Ichsani, M.Eng.

Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada Penulis, dapat disampaikan melalui email bagusatus@gmail.com.